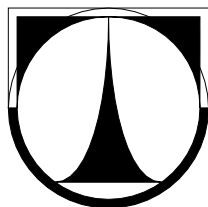


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Ústav zdravotnických studií



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2011

Zlatko Kozic

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Ústav zdravotnických studií

Studijní program: B3944 – Biomedicínská technika

Studijní obor: 3901R032 – Biomedicínská technika

Mapování elektromagnetického pole mikrovlnných zdrojů a jeho absorpce v živých organismech a biologických tkáních

Mapping of electromagnetic field of microwave sources and its absorption in living organisms and biological tissues

Zlatko Kozic

Bakalářská práce

2011

Zadání...

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat především Ing. Martinovi Truhlářovi, za jeho ochotu, nápady, odborné vedení a pomoc při zpracování této bakalářské práce. Dále mé poděkování patří konzultantovi Prof. Ing. Aleši Richterovi, CSc. za podnětné rady a návrhy, mému ochotnému spolužákovi Štěpánu Mindlovi, který sehrál úlohu figuranta při měření pole a v neposlední řadě mým trpělivým rodičům, kteří mne celou dobu vydatně podporovali.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá působením elektromagnetického pole na biologický materiál, se zaměřením na mikrovlnné frekvence z vybraných zdrojů mikrovlnného záření. Úkolem bylo blíže se seznámit s vlastnostmi elektromagnetického pole a jeho interakcí s biologickým materiálem. Dále provést praktická měření pomocí tří metod, a to ve volném prostoru, ve vlnovodu a s využitím materiálového analyzátoru (kapacitní metoda). Výsledky těchto měření se poté zpracovali do přehledných grafů a tabulek a naměřená data se porovnávala s hygienickými normami České republiky.

Klíčová slova: elektromagnetické pole, mikrovlny, vlnovod, útlum, komplexní permitivita, biologický materiál

Abstract

This Bachelor's Thesis deals with the effects of electromagnetic field on biological materials, focusing on the microwave frequency from selected sources of microwave radiation. The task was to get to know characteristics of the electromagnetic field and its interaction with biological material. Furthermore to do practical measurements using three methods, namely in the free space, in the waveguide and using a material analyzer (capacitance method). The results of these measurements are then transformed into graphs and tables and the measured data are compared with the hygienic standards of the Czech Republic.

Key words: electromagnetic field, microwaves, waveguide, damping, complex permittivity, biological material

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů.....	9
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek.....	11
1 Úvod	12
2 Mikrovlny	13
2.1 Elektromagnetismus	13
2.2 Mikrovlnné pásmo.....	15
2.3 Využití	16
2.4 Zdroje (Mikrovlnné aktivní prvky)	17
2.4.1 Společné vlastnosti mikrovlnných elektronek	18
2.4.2 Magnetron	19
2.4.3 Klystron	20
3 Mikrovlnná trouba	22
3.1 Historie	22
3.2 Princip.....	22
3.3 Stavba	23
4 Teorie elektromagnetického vlnění	24
4.1 Složení	24
4.2 Maxwellovy rovnice.....	24
4.3 Vlnové rovnice	26
4.4 Konstanta šíření.....	27
4.5 Komplexní permitivita.....	28
4.6 Odraz a dopad elmag. vln pod úhlem	28
4.7 Impedance prostředí	29
4.8 Dopad rovinné vlny na rozhraní dvou prostředí.....	30
4.9 Útlum elektromagnetických vln	30
5 Vlnovody	31
5.1 Vlastnosti obdélníkové vlnovodu	31
6 Bezpečnost.....	34
6.1 Biologické účinky	35
6.1.1 Netepelné účinky	35
6.1.2 Tepelné účinky	36
6.2 Vhodné veličiny pro definici hygienických norem	36
6.3 Hygienické normy	37
6.3.1 Hygienická norma podle ANSI	38

6.3.2	Výnos hlavního hygienika ČR z roku 1990.....	38
6.3.3	Nařízení vlády č. 480/2000 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením.....	39
7	Praktická část.....	41
7.1	Měření ve vlnovodu.....	41
7.1.1	Příprava.....	41
7.1.2	Výsledky	42
7.2	Měření na materiálovém analyzátoru	43
7.2.1	Příprava.....	43
7.2.2	Měření a zpracování.....	43
7.3	Měření elektromagnetického pole	51
7.3.1	Příprava.....	51
7.3.2	Grafické znázornění výsledků	53
8	Závěr	57
	Seznam zdrojů použitých obrázků	58
	Seznam použité literatury	59
	Seznam příloh	61

Seznam použitých zkratk a symbolů

Symbol	Veličina	Jednotka
ARD	Absorption Rate Density	W/m ³
SAR	Specific Absorption Rate	W/kg
\vec{B}	magnetická indukce	T
c	rychlost světla ve vakuu	m/s
\vec{D}	elektrická indukce	C/m ²
\vec{E}	intenzita elektrického pole	V/m
f	vlnová frekvence	Hz
λ	vlnová délka	mm
h	Planckova konstanta	Js
\vec{H}	intenzita magnetického pole	A/m
\vec{J}	proudová hustota	A/m ²
m	hmotnost	g
n	index lomu	1
T	teplota	°C
t	čas	s
V	objem	m ³
ε	permitivita	F/m
$\hat{\varepsilon}$	komplexní permitivita	F/m
$\hat{\varepsilon}_{rr}$	komplexní permitivita – reálná část	F/m
$\hat{\varepsilon}_{ri}$	komplexní permitivita – imaginární část	F/m
μ	permeabilita	H/m
σ	měrná vodivost(konduktivita)	Sm ⁻¹
η	účinnost	%
ω	úhlová rychlost	1/s
δ	hloubka vniku	mm
Z	impedance prostředí	Ω
v	fázová rychlost	m/s
T	činitel prostupu	1
R	činitel odrazu	1
a, b	rozměry vlnovodu	mm
k	konstanta šíření	1/m
α	fázová konstanta	1/m
β	měrný útlum	1/m

Seznam obrázků

Obrázek 1.1. Elektromagnetické spektrum.....	14
Obrázek 2.1. Magnetron.....	19
Obrázek 2.2. Řez magnetronem.....	19
Obrázek 2.3. Stavba magnetronu	20
Obrázek 2.4. Reflexní klystron	21
Obrázek 2.5. Zesilovací klystron	21
Obrázek 3.1. Radarange.....	22
Obrázek 3.2. Natáčení dipólu.....	22
Obrázek 3.3. Řez mikrovlnnou troubou	23
Obrázek 4.1. Vektor elektromagnetické vlny	24
Obrázek 4.2. Dopad vlnění	28
Obrázek 4.3. Difrakce.....	29
Obrázek 5.1. Rozměry vlnovodu	32
Obrázek 5.2. Siločáry, 1 - rozložení siločar v rovině xz, 2 - rozložení siločar v rovině yz, 3 - rozložení siločar v rovině xy.....	34
Obrázek 7.1 Měřicí pracoviště,.....	41
Obrázek 7.2. Plátek vepřového masa 1 cm.....	42
Obrázek 7.3. Plátek vepřového masa 2,5 cm.....	42
Obrázek 7.4. Vepřové ve vlnovodu.....	42
Obrázek 7.5. Sevřený fantom.....	42
Obrázek 7.6. Graf závislosti frekvence na prostupu záření masem	42
Obrázek 7.7. Graf závislosti frekvence na prostupu záření fantomem	43
Obrázek 7.8. Vzorky tkání,	44
Obrázek 7.9. Čelisti analyzátoru	44
Obrázek 7.10. Graf tlumené vlny v materiálu při frekvenci 50 MHz	45
Obrázek 7.11. Graf tlumené vlny v materiálu při frekvenci 1 GHz.....	45
Obrázek 7.12. Graf obálky vlny v materiálu na délce 0,6 m pro frekvenci 50 MHz.....	46
Obrázek 7.13. Graf obálky vlny v materiálu na délce 0,6 m pro frekvenci 1 GHz	46
Obrázek 7.14. Graf odrazu vlny od materiálu tloušťky 10 mm.....	47
Obrázek 7.15. Graf průchodu vlny do materiálu tloušťky 10 mm.....	47
Obrázek 7.16. Graf amplitudy odrazu	48
Obrázek 7.17. Graf amplitudy průchozí	48
Obrázek 7.18. Graf útlumu vlny v mase bůčku tloušťky 10 mm.....	49
Obrázek 7.19. Graf útlumu vlny v tuku bůčku tloušťky 10 mm.....	49
Obrázek 7.20. Graf hloubky vniku vlny	50
Obrázek 7.21. Graf komplexní permitivity bůčku	50
Obrázek 7.22. Měřicí pole	51
Obrázek 7.23. Figurant v poli a zdroj.....	52
Obrázek 7.24. Graf hustoty dopadajícího výkonu mikrovlnky.....	53
Obrázek 7.25. Graf hustoty dopadajícího výkonu mikrovlnky ovlivněné figurantem....	53
Obrázek 7.26. 3D graf hustoty dopadajícího výkonu mikrovlnné trouby	54
Obrázek 7.27. 3D graf hustoty dopadajícího výkonu mikrovlnné trouby ovlivněné figurantem.....	54
Obrázek 7.28 Graf hustoty dopadajícího výkonu wifi vysílače.....	55
Obrázek 7.29 Graf hustoty dopadajícího výkonu wifi vysílače ovlivněné figurantem...55	55
Obrázek 7.30 3D Graf hustoty dopadajícího výkonu wifi vysílače	56
Obrázek 7.31 3D Graf hustoty dopadajícího výkonu wifi vysílače ovlivněné figurantem	56

Seznam tabulek

Tabulka 2.1. Označení kmitočtových pásem dle IEEE	15
Tabulka 6.1. Snesitelné ozáření obyvatelstva	38
Tabulka 6.2. Přípustné ozáření pracovníků	39
Tabulka 6.3. Nepřekročitelné limity ozáření obyvatelstva	39
Tabulka 6.4. Nepřekročitelné limity ozáření pracovníků	39
Tabulka 6.5. Nejvyšší přípustné hodnoty J	40
Tabulka 6.6. Nejvyšší přípustné hodnoty SAR a SA	40
Tabulka 6.7. Nejvyšší přípustné hodnoty S	40

1 Úvod

V současné přetechizované době nás ve zvýšené míře obklopuje kromě přírodních také mnoho umělých elektromagnetických polí. Tato nepřírodní elektromagnetická pole mohou působit na člověka, ačkoliv si to neuvědomuje. K nejznámějším producentům těchto polí patří například mobilní telefony, wifi sítě nebo mikrovlnné trouby, z nichž všechny se staly v nedávném čase součástí našeho každodenního života. Vzhledem k neustálému vystavování člověka těmto umělým elektromagnetickým polím, je nutné oblast interakce biologického materiálu a elektromagnetických vln blíže zkoumat.

V této práci se nejprve seznámíme s elektromagnetismem, mikrovlnami a základními vztahy elektromagnetického vlnění. Dále si řekneme něco o vlnovodu, a seznámíme se se zněním hygienických předpisů pro elektromagnetické záření. V praktické části se budeme zabývat měřením útlumu elektromagnetického vlnění v biologickém materiálu ve vlnovodu a vyzkoušíme i útlum fantomu, napodobeniny biologické tkáně. Také provedeme měření komplexní permitivity různých druhů běžně dostupných biologických tkání pomocí kapacitního principu a na konec změříme elektromagnetické pole vyzařované běžně dostupnými zdroji mikrovlnného záření a působení biologického objektu na něj.

2 Mikrovlny

2.1 Elektromagnetismus

Elektromagnetické pole je fyzikální pole, které je výsledkem působení elektrické a magnetické síly v prostoru. Skládá se tedy ze dvou fyzikálně propojených polí, elektrického a magnetického. Pro zohlednění těchto polí se ve vzorcích popisujících elektromagnetické pole užívá jedné charakteristické veličiny pro každé z nich. Zástupcem elektrického pole je intenzita elektrického pole, vlastnosti magnetického pole popisuje magnetická indukce.

Základním parametrem elektromagnetického vlnění je frekvence f nebo vlnová délka λ pro které platí vzájemný vztah

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.01)$$

kde c je rychlost světla tj. $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$.

Elektromagnetické pole je nositelem základních vlastností, kterými se jinak vyznačuje látka. Pole je nositelem energie, je schopno konat práci, má svou vlastní hybnost a také příslušnou hmotnost, která je vázána s jeho energií Einsteinovým vztahem

$$W = mc^2. \quad (1.02)$$

Dále víme, že energie přenášená elektromagnetickými vlnami se dokáže předávat jenom jako násobek určitého minimálního kvanta nazývaného foton (tzv. polní částice). Energie fotonu je závislá na kmitočtu vlny f podle vztahu

$$W_f = hf \quad (1.03)$$

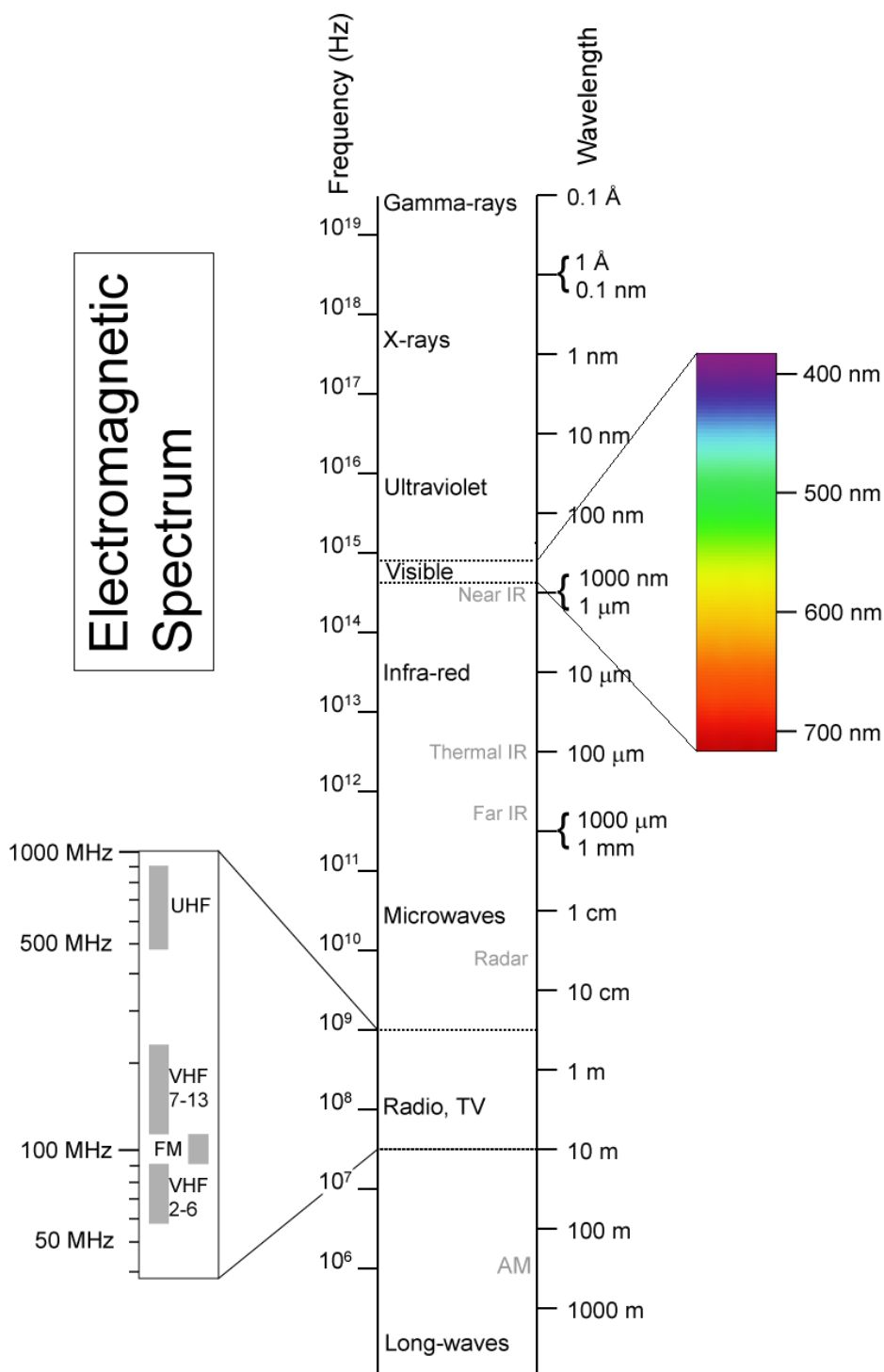
ve kterém $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ je Planckova konstanta. Při nulové frekvenci je tedy hmotnost nulová.

Energie a hmotnost světla se ve vakuu přenáší rychlostí světla. Dopadá-li světlo např. na lopatku Crookesova mlýnku o hmotnosti m a změní její rychlost o dv , předalo tím lopatce část své hybnosti podle rovnice

$$mdv = cdm_v = \frac{dW}{c} \quad (1.04)$$

kde dm_v je změna hmotnosti vlny a dW změna její energie. Hybnost vlny je W/c .

Pro názornost se elektromagnetické vlnění všech možných frekvencí zakresluje do elektromagnetického spektra (viz Obrázek 1.1), ve kterém se také označují jednotlivé pojmenované oblasti. Tyto oblasti na sebe ne vždy těsně naléhají a mnohdy se částečně překrývají.



Obrázek 2.1. Elektromagnetické spektrum

2.2 Mikrovlnné pásmo

Mikrovlnami je nazýváno elektromagnetické vlnění v určité oblasti elektromagnetického spektra. Konkrétněji se jedná o frekvenční pásmo mezi rádiovými vlnami a infračerveným vlněním, přibližně od 300 MHz do 3 THz. Vlnová délka mikrovln se tedy pohybuje od 1 m do 0,1 mm. Toto pásmo se pak dále rozděluje na dílčí pásma, z nichž každé má svá technologická specifika. V následující tabulce je rozdělení doporučené IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers).

Tabulka 2.1. Označení kmitočtových pásem dle IEEE

Pásmo	Označení frekvenčního pásma	Frekvence	Vlnová délka
9	UHF (Ultra High Frequency)	300 – 3000 MHz	100 – 10 cm
10	SHF (Super High Frequency)	3 – 30 GHz	10 – 1 cm
11	EHF (Extreme High Frequency)	30 – 300 GHz	1 – 0,1 cm
12	Decimillimeter	300 – 3000 GHz	1 – 0,1 mm

V případě, že je elektromagnetická energie buzena v prostředí s vysokou relativní permeabilitou nebo permitivitou, využijí se principy mikrovlnné techniky i při nižších kmitočtech. Například při aplikacích v lékařství může být délka elektromagnetické vlny v biologické tkáni kratší než 1 m již při frekvencích řádově desítky MHz.

Fyzikálně-technický princip mikrovlnné techniky výhodně umožňuje:

- Využití nových, zatím méně obsazených kmitočtových pásem.
- Realizaci obvodů s velkou šířkou přenášeného frekvenčního pásma (řádově 100 MHz až 10 GHz), což podle teorie rádiové komunikace znamená možnost dosáhnout značné rychlosti přenosu informace.
- Při projektování obvodů s rozloženými parametry realizovat miniaturní systémy, jelikož dimenze jednotlivých mikrovlnných prvků se odvíjejí od vlnové délky.
- Využívat velmi malé antény při zachování jejich vysoké směrovosti (poměr rozměrů a délky vyzařované vlny).
- Využívat přímočarého šíření mikrovlnné energie, neboť nedochází k odrazu signálu ionosférou.

- f) Využívat rozdílných mikrovlnných zařízení pro základní vědecký výzkum, jako např. pro dálkové snímání objektů, lékařskou diagnostiku a léčbu, úpravu potravy a jiné. (často se tyto metody zakládají na tom, že vlastní rezonance atomů a molekul jsou ve vyšší frekvenční části mikrovlnného spektra)

2.3 Využití

Mikrovlnná technika má široké využití v mnoha rozdílných aplikacích v oblasti komunikací, navigace, průmyslu, sledování a řízení dopravy, medicíny a jiných.

Průmyslové aplikace – Výhodné použití mikrovlnné energie pro ohřev, případně vysoušení materiálů v rámci technologických procesů. Využívá se prostupu vysokofrekvenční energie celým materiálem, který má zpravidla povahu ztrátového dielektrika, tudíž absorbující mikrovlnná energie se mění na teplo. Tímto způsobem se materiál ohřívá v celém svém objemu a není nutné čekat na ohřátí jeho středu pomocí tepelného vedení. Mezi plynoucí výhody pak patří větší rychlost a bezpečnost ohřevu, ekologické výhody (splodiny, saze) a nakonec také vyšší kvalita.

Využití ve spojích – Již nějakou dobu jsou důležité tzv. radioreléové spoje. Informace v této síti je přenášena směrovým svazkem vytvořeným pomocí parabolické nebo trychtýřovité antény. Dále je výhod mikrovlnné techniky využito u satelitních spojů. Zde se využívá geostacionárních satelitů (z hlediska pozorovatele, spočívají na stejném místě) a prostupnost mikrovln ionosférou, která se pro nižší kmitočty chová jako reflektor. Elektromagnetickým vlněním v mikrovlnném pásmu jde také dosáhnout dostatečně úzkého svazku s anténou o přijatelných rozměrech. V neposlední řadě se pro komunikaci využívá mikrovlnného pásma v mobilních telefonech. U tohoto využití se stále více diskutuje ohledně nepříznivého vlivu na biologickou tkáň.

Doprava a navigace – Radar (RAdio Detection And Ranging) je starý ale velmi známý přístroj pracující v mikrovlnném pásmu. Má mnohostranné využití jako např. řízení letového provozu, navigace a bezpečnost dopravy, atd. Důležité jsou i satelitní navigační systémy. Mikrovlnné senzory umožňují sledovat intenzitu dopravy, a proto mohou být účinnou pomůckou pro řízení dopravy. Jiné typy senzorů se dají využít v oblasti bezpečnosti dopravy.

Základní i aplikovaný výzkum – Vysokofrekvenční obvody jsou součástí různých typů urychlovačů částic, využívaných např. pro radioterapii, výzkum vlastností materiálů, atd. Pro výzkum vesmíru jsou využívány mikrovlnné radiometry. Ty se dají použít také k průzkumu povrchu Země.

Mikrovlnná zařízení v domácnostech – Zřejmě první co člověka napadne při zmínění slova mikrovlny je mikrovlnná trouba, kterou v dnešní době už vlastní velká část domácností. Způsob úpravy potravy pomocí mikrovln má jak svá pozitiva, tak také negativa. Dalším zařízením v domácnosti, které se v poslední době rozmohlo hlavně díky digitalizaci, je přijímač satelitní televize.

Mikrovlnné senzory a diagnostika – Různorodé typy senzorů na mikrovlnné bázi umožňují realizovat snímače pro různé aplikace. Tyto senzory umožňují např. měření vlhkosti, rychlosti či její změny popřípadě zjišťování pohybu. Dále se okrem principu ionizující tomografie využívá i mikrovlnné tomografie.

Aplikace mikrovlnné techniky v lékařství – V onkologii se využívá mikrovlnné hypertermie, kdy se využívá toho, že některé nádorové buňky jsou citlivé na vyšší teplotu než 42 °C, kdežto zdravé odolávají zvýšení teploty až do 45 °C. Ohřátí biologické tkáně na nižší teplotu, se využívá při rehabilitacích a fyzikální léčbě. Také ohřívání na vyšší teplotu než 45 °C (termokoagulace) se v lékařství využívá a to při léčbě prostaty. V kardiologii se využívá mikrovlnné anténky v kateteru, s jejíž pomocí lze bezpečněji odstranit sklerotické pláty na stěnách cév. Velmi často se v chirurgii užívá mikrovlnného skalpelu. Takovýmto skalpelem lze zastavovat krvácení a při řezání samotném krvácení snižuje.

2.4 Zdroje (Mikrovlnné aktivní prvky)

Prvním prakticky využitelným zdrojem mikrovlnného záření byla elektronka nazvaná magnetron. Ta byla vyvinuta ve třicátých letech dvacátého století v Anglii a využívána byla ke konstrukci radarů, které našli důležité uplatnění v průběhu druhé světové války. Od té doby byly vynalezeny další typy mikrovlnných elektronek na generování a zesilování mikrovlnné energie. I přesto, že jsou v poslední době mikrovlnné elektronky nahrazovány polovodičovými prvky a obvody, uplatňují se pro generování velkých výkonů, tj. desítky až stovky Wattů, avšak lze dosáhnout výkonů v řádech 10 kW až 10 MW. Vyšší část tohoto rozpětí lze však generovat a přenášet

pouze v pulzním režimu. Mezi základní typy mikrovlnných elektronek patří klystron a magnetron.

2.4.1 Společné vlastnosti mikrovlnných elektronek

Přesto, že se jednotlivé mikrovlnné elektronky liší jak svou konstrukční geometrií, tak i principem činnosti, mají několik společných vlastností:

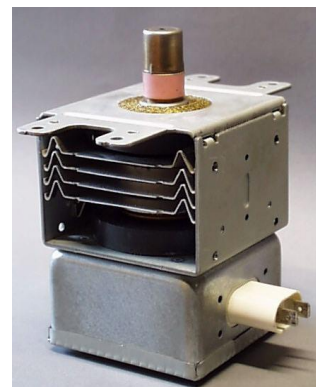
- pro svoji činnost využívají všechny elektronky interakci mezi svazkem elektronů a vysokofrekvenčním elektromagnetickým polem ve vakuu uvnitř kovového nebo skleněného pláště,
- výstup vysokofrekvenční energie zpravidla umožňuje koaxiální sonda nebo smyčka, resp. rezonanční okno,
- rozžhavená katoda emituje elektrony. Tyto katody jsou zpravidla zkonstruovány z kovu, jehož povrchu je barium oxid nebo wolfram,
- proud elektronů je zaostřován do úzkého svazku anodou s vysokým napětím. Alternativně se pro zaostření elektronů používá sfenoidální elektromagnet,
- na pulzní provoz se používá elektroda pro modulaci svazku (kladné předpětí elektrony urychluje, záporné naopak zpomaluje).

Podle typu interakce elektronového svazku s elektromagnetickým polem lze mikrovlnné elektronky rozdělit do dvou skupin:

- elektronky s lineárním svazkem (proud elektronů prochází elektronkou a je rovnoběžný s orientací elektromagnetického pole),
- elektronky s příčným polem (fokusující pole je kolmé k urychlujícímu elektrickému poli).

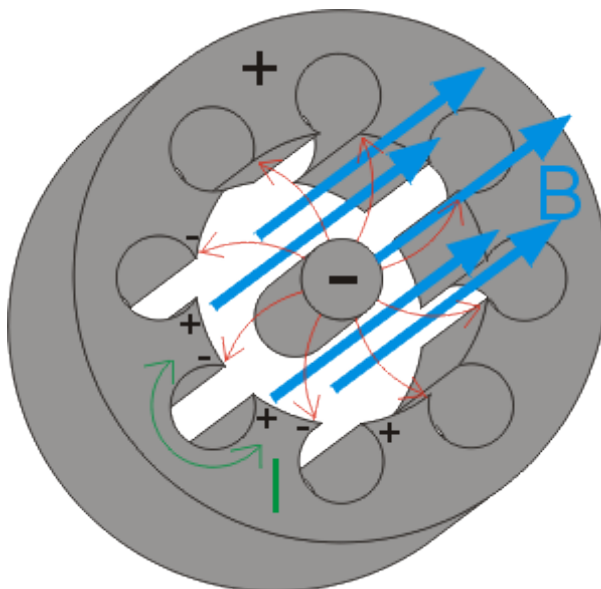
2.4.2 Magnetron

Magnetron (Obrázek 2.1) patří mezi tzv. elektronky s příčným polem. Je tvořen katodou válcového tvaru, okolo které je umístěna anoda taktéž válcového tvaru. Na vnitřní straně anody je umístěn systém dutinových rezonátorů, naladěných na požadovanou výstupní frekvenci. Vnější stejnosměrné magnetické pole je orientováno rovnoběžně se společnou osou katody a anody (Obrázek 2.2). Dráha elektronů vyzařovaných katodou je urychlován a zakřívován vnějším magnetickým polem a výsledkem je kruhová dráha okolo katody (Obrázek 2.3).

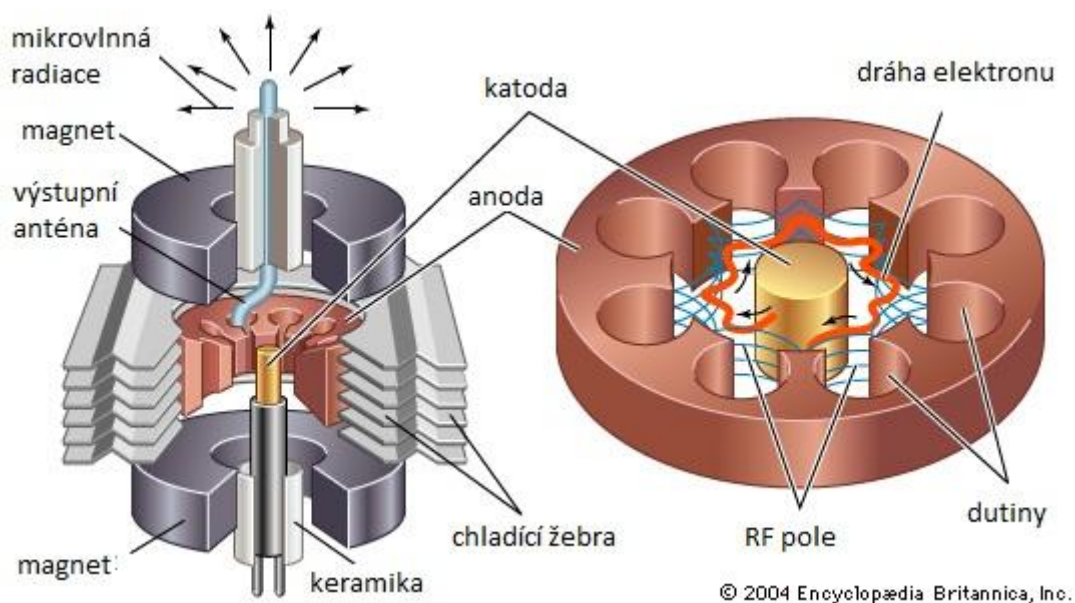


Obrázek 2.2. Magnetron

Taktéž dochází ke shlukování elektronů a tím se energie elektronového svazku přeměňuje na energii výstupní vysokofrekvenční vlny. Ta se pak váže na výstupní vedení přes rezonanční okno, kapacitní sondu resp. vazební smyčku. Při poměrně vysoké účinnosti, typicky až 80%, umožňují magnetrony generovat výkony na úrovni několika kW.



Obrázek 2.3. Řez magnetronem



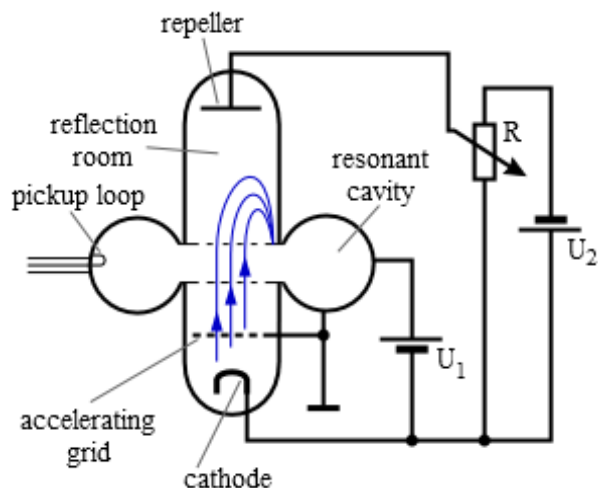
Obrázek 2.4. Stavba magnetronu

2.4.3 Klystron

Klystron je elektronka s lineárním svazkem. Užívá se jako oscilátor i jako zesilovač. Podle toho se liší konstrukce jeho variant – mívá buď jednu, nebo dvě i více rezonančních dutin.

Reflexní klystron

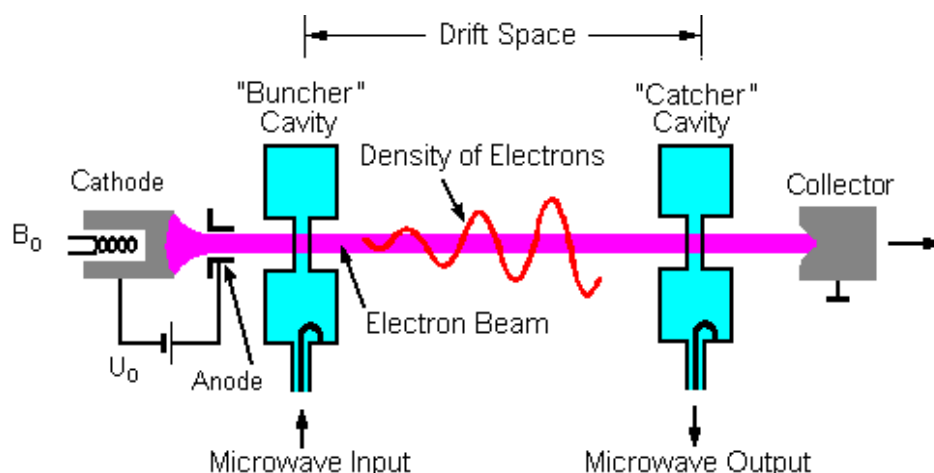
Pro generování mikrovlnného signálu se užívá reflexní klystron, mající jednu rezonanční dutinu. Ta má kladné předpětí. Kolmo na tuto rezonanční dutinu je uložena tuba. Na jednom jejím konci je katoda (elektronová puška), z které jsou emitovány elektrony a poté co proletí skrz rezonanční dutinu, jsou odrazeny tzv. reflektorem (elektroda se záporným předpětím). Na cestě zpět jsou elektrony v rezonátoru již zachytávány (Obrázek 2.4), čímž vzniká kladná zpětná vazba a tedy i oscilace. Klystrony lze změnou rozměru rezonanční dutiny přeladovat.



Obrázek 2.5. Reflexní klystron

Zesilovací klystron

V nejjednodušším složení má zesilovací klystron dva rezonátory (připojené ke zdroji kladného napětí), kterými prolétá elektronový svazek (Obrázek 2.5). Ten je zaostřován pomocí trvalého magnetického pole, vytvářeného magnetem. Vstupní rezonátor je umístěn blíže ke katodě a svým elektrickým polem rychlostně moduluje elektronový svazek. V obdobích záporného pole elektrony zpomaluje a v obdobích kladného pole je urychluje. To se projeví v určité vzdálenosti za vstupním rezonátorem hustotní modulací elektronového svazku. Urychlené elektrony zde dostihnou elektrony zpomalené a vytvářejí se tzv. shluky elektronů.



Obrázek 2.6. Zesilovací klystron

Výstupní rezonátor je umístěn ve vzdálenosti, kde je svazek dostatečně urychlen a hustotně promodelován. Elektrické pole výstupního rezonátoru brzdí shluky elektronů a tím se získává z elektronového svazku zesílený mikrovlnný výkon. Elektrony potom dopadají na kolektor a tím se jejich energie přemění na teplo.

3 Mikrovlnná trouba

3.1 Historie

Ohřev pomocí mikrovln byl objeven šťastnou náhodou Percy Spencerem, Americkým inženýrem samoukem, který stavěl magnetrony pro Americkou společnost Raytheon vyrábějící mimo jiné radary. Jednoho dne roku 1945 při práci na aktivním radaru zjistil, že se mu v kapse rozpustila čokoládová tyčinka. Po tomto nenadálém zjištění úspěšně učinil podobný pokus s kukuřicí a vejcem. Pro další ověření této nově nabyté znalosti vehnal mikrovlnou energii do uzavřeného kovového boxu, ve kterém

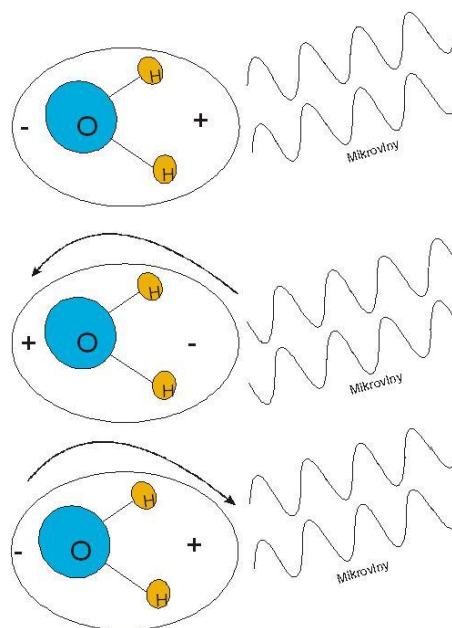


Obrázek 3.1. Radarange

teplota vloženého jídla rychle rostla. V roce 1947 byla postavena první mikrovlnná trouba pro komerční využití na světě, Radarange (Obrázek 3.1). Měla skoro dva metry, vážila 340 kg a stála pět tisíc dolarů. Navíc její spotřeba byla tři kilowaty a magnetron se musel chladit vodou. Postupným vývojem hlavně v Americe a také Japonsku, kde přišli s přepracovanými magnetrony umožňujícími levnější spotřebiče, a dále klesajícími cenami mikročipů, které umožňovali jednodušší ovládání, si našli mikrovlnky místo ve většině našich domácností.

3.2 Princip

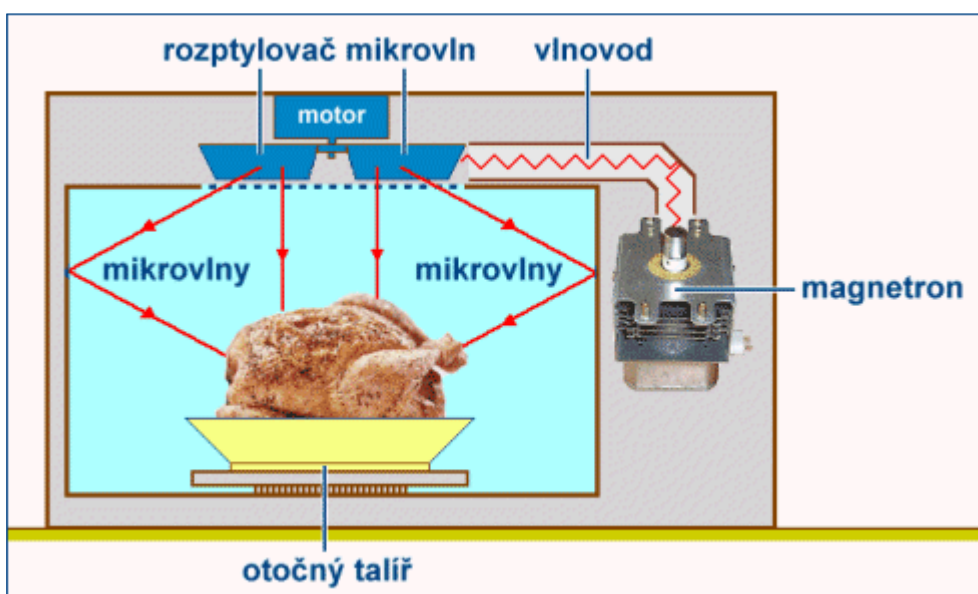
Magnetron vysílá mikrovlnné vlnění na frekvenci 2,45 GHz, čemuž odpovídá vlnová délka přibližně 12 cm. Toto vlnění působí na molekuly, které nejsou díky své stavbě elektricky neutrální. Mezi těmito má v potravě nejčastější zastoupení voda, se svými dvěma atomy vodíku na jednom atomu kyslíku, je řádným představitelem dipólu. Při ozařování mikrovlnným vlněním se dipóly snaží přizpůsobit tomuto elektromagnetickému vlnění (Obrázek 3.2), čímž dochází k jejich rozkmitání, rezonanci a dielektrickému ohřevu. Vedením a prouděním dále dochází i k ohřevu dalších složek potravy, které jsou ovlivněny tímto polem méně nebo vůbec.



Obrázek 3.2. Natáčení dipólu

3.3 Stavba

Uživatelské rozhraní mikrovlnné trouby se liší jak značkou tak také cenou. Vždy lze nastavovat čas trvání a výkon, o zapnutí a vypnutí se starají tlačítka Start a Stop. Dražší modely mikrovlnek mohou mít přednastavené programy, které samy nastaví dobu a sílu ohřevu, nebo jsou kombinovány s horkovzdušnou troubou či grilem. Celé nastavení chodu trouby je pak zpracováno mikročipem. Ten řídí elementární prvek mikrovlnné trouby, zdroj elektromagnetického záření, magnetron. O přísun vysokého napájecího napětí magnetronu se stará buď transformátor, nebo elektronický výkonový konvertor. Mezi další elektronické součástky mikrovlnky patří vysoko napěťový kondenzátor připojený k magnetronu, transformátoru a přes diodu na kostru. Mikrovlnné záření se z magnetronu dostává pomocí vlnovodu do ohřívacího prostoru (Obrázek 3.3). Ten má kovový povrch, od kterého se mikrovlny z větší části odrazí. Mřížka ve dvířkách je uzpůsobena k ochraně obsluhy a kontrole ohřívacího prostoru.



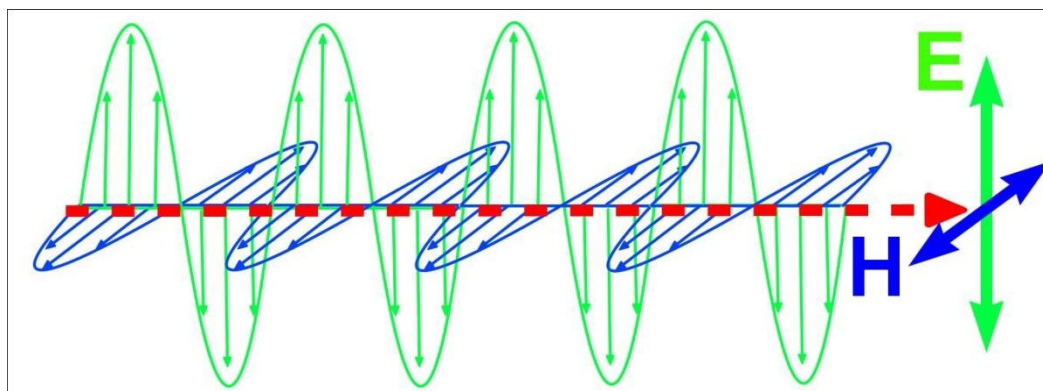
Obrázek 3.3. Řez mikrovlnnou troubou

Ohřívací prostor má rozměry odpovídající celým násobkům poloviny vlnové délky užitého záření, čímž dochází ke vzniku stojatého vlnění. K nejvýznamnějšímu ohřevu proto dochází v kmitnách vlnění. Aby se potraviny ohřívaly rovnoměrněji (kmitny procházeli různými místy pokrmu), byly do mikrovlnek dříve instalovány rozptylovače mikrovln, které nahradili otočné talíře instalované do ohřívacího prostoru.

4 Teorie elektromagnetického vlnění

4.1 Složení

Elektromagnetické záření je formou energie chovající se jako vlnění. Má jak elektrickou tak magnetickou složku, které oscilují ve fázi kolmo na směr šíření energie a jsou na sebe kolmé (Obrázek 4.1). Časově proměnné elektrické pole generuje časově proměnné magnetické pole a obráceně.



Obrázek 4.1. Vektor elektromagnetické vlny

Energie transportovaná elektromagnetickým polem, která prochází jednotkovou plochou za sekundu je určena Poytingovým vektorem

$$\vec{N} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (4.01)$$

Směr toku energie je shodný se směrem šíření vlny.

4.2 Maxwellovy rovnice

Výpočet veličin elektromagnetického pole znamená řešit Maxwellovy rovnice, jakožto základní rovnice elektrodynamiky. Tento soubor rovnic lze zapsat v integrálním tvaru, kdy platí zcela obecně (popisují elektromagnetické pole v jisté oblasti)

$$\oint_c \vec{H} dl = \Sigma I + \frac{d\psi}{dt} \quad (4.02)$$

$$\oint_c \vec{E} dl = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (4.03)$$

$$\oint_s \vec{D} dS = \Sigma Q \quad (4.04)$$

$$\oint_s \vec{B} dS = 0 \quad (4.05)$$

kde \vec{H} značí vektor intenzity magnetického pole, ΣI celkový vodivý proud, $\frac{d\psi}{dt}$ (ψ je tok elektrického pole plochou S), t čas. \vec{E} náleží vektoru intenzity elektrického pole, Φ magnetickému indukčnímu toku, \vec{D} pak vektoru elektrické indukce, Q volnému náboji a \vec{B} vektoru magnetické indukce.

Nebo lze tyto rovnice převést do diferenciálního tvaru, kdy platí pouze v tzv. regulárních bodech pole, v nichž veličiny pole jsou spojitě a spojitě diferencovatelné funkce polohy (popisují elektromagnetické pole v určitém bodu této oblasti)

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J}_0 + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (4.06)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4.07)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \varrho_0 \quad (4.08)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (4.09)$$

kde J_0 je hustota vodivého proudu a ϱ_0 objemová hustota volného náboje. První dvě Maxwellovy rovnice jsou hlavní a vyjadřují vazbu mezi elektrickým a magnetickým polem. Řešení problémů elektromagnetického pole znamená řešit soustavu těchto dvou parciálních diferenciálních rovnic. Zbylé dvě rovnice bývají nazývány jako tzv. doplňující Maxwellovy rovnice. Umožňují určit počáteční a okrajové podmínky a tak i jednoznačné řešení soustavy prvních dvou Maxwellových rovnic.

Následují tři materiálové rovnice, umožňující řešit Maxwellovy rovnice v nehomogenním prostředí

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (4.10)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (4.11)$$

$$\vec{J}_0 = \sigma \vec{E} \quad (4.12)$$

v nichž se vyskytují materiálové konstanty:

- ε značí permitivitu prostředí,
- μ značí permeabilitu prostředí,
- σ značí měrnou elektrickou vodivost prostředí.

Hodnotu permitivity ε a permeability μ lze dále rozepsat známým způsobem

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad (4.13)$$

kde ε_0 je permitivita vakua

$$\varepsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi \cdot c^2} = 8,854188 \cdot 10^{-12} [F \cdot m^{-1}] \quad (4.14)$$

a ε_r je relativní permitivita daného prostředí. Dále

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (4.15)$$

kde μ_0 permeabilita vakua

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1,256637 \cdot 10^{-6} [H \cdot m^{-1}] \quad (4.16)$$

a μ_r je relativní permeabilita daného prostředí.

4.3 Vlnové rovnice

Vycházejí z MR, uvažujeme-li lineární, homogenní, izotropní prostředí (ε , μ , γ jsou konstanty), bez vnucených sil a bez nábojů, pak pro vektory E a H platí tzv. zobecněné vlnové rovnice

$$\Delta \vec{E} - \mu\gamma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (4.17)$$

$$\Delta \vec{H} - \mu\gamma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (4.18)$$

Tytéž diferenciální rovnice platí i pro vektory D , B a J . Jsou to rovnice vektorové, tj. každá představuje tři skalární rovnice pro tři složky. V napsaném tvaru platí pro libovolnou křivočarou soustavu souřadnic. Symbol Δ značí Laplaceův skalární operátor (Laplacián), který lze rozepsat pomocí operátoru nabra, resp. pomocí operátorů divergence a gradientu

$$\Delta = \nabla^2 = \text{div grad} \quad (4.19)$$

speciálně pro trojrozměrný prostor pak jako

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (4.20)$$

4.4 Konstanta šíření

Součinitel přenosu (konstanta šíření) k popisuje změnu amplitudy a fáze vlnění. Je určena

$$k^2 = -j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon) = \omega^2\mu\varepsilon - j\omega\mu\sigma \quad (4.21)$$

odmocněním k^2 získáme dvě hodnoty $\pm k$, které lze vyjádřit složkami α a β , takže platí

$$k = \alpha - j\beta \quad (4.22)$$

kde β značí měrný útlum a α je měrná fáze (fázová konstanta). Měrný útlum nám říká, k jakému poklesu amplitudy dojde na délce 1 metr. Fázová konstanta popisuje změnu fáze vlny na délce 1 metr ve směru jejího šíření.

Veličiny α a β lze odvodit z rovnosti rovnic 4.21 a 4.22. Vyjde

$$\alpha = \omega \sqrt{\left\{ \frac{\mu\varepsilon}{2} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2\varepsilon^2}} \right] \right\}} \quad (4.23)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\left\{ \frac{\mu\varepsilon}{2} \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2\varepsilon^2}} \right] \right\}} \quad (4.24)$$

Fázová konstanta spolu s úhlovým kmitočtem určuje fázovou rychlost

$$v_f = \frac{\omega}{\alpha} \quad (4.25)$$

Ta určuje pouze rychlost, s jakou se přesouvají body s danou fází vlnění. Neurčuje rychlost, s jakou se např. pohybuje hmotný kmitající bod. Tato rychlost může nabývat libovolné hodnoty, včetně hodnot větších než rychlost světla. Důvodem je to, že fázová rychlost neurčuje rychlost přenosu informace, tzn. informace se nešíří fázovou rychlostí, ale rychlostí skupinovou.

Místo měrného útlumu se zpravidla počítá s převrácenou hodnotou

$$\delta = \frac{1}{\beta} \quad (4.26)$$

která se nazývá hloubka vniku. Hloubka vniku udává vzdálenost od rozhraní, v níž klesne amplituda na e^{-1} (36,8 %) své hodnoty na rozhraní.

4.5 Komplexní permitivita

Ztrátové prostředí se popisuje komplexní relativní permitivitou

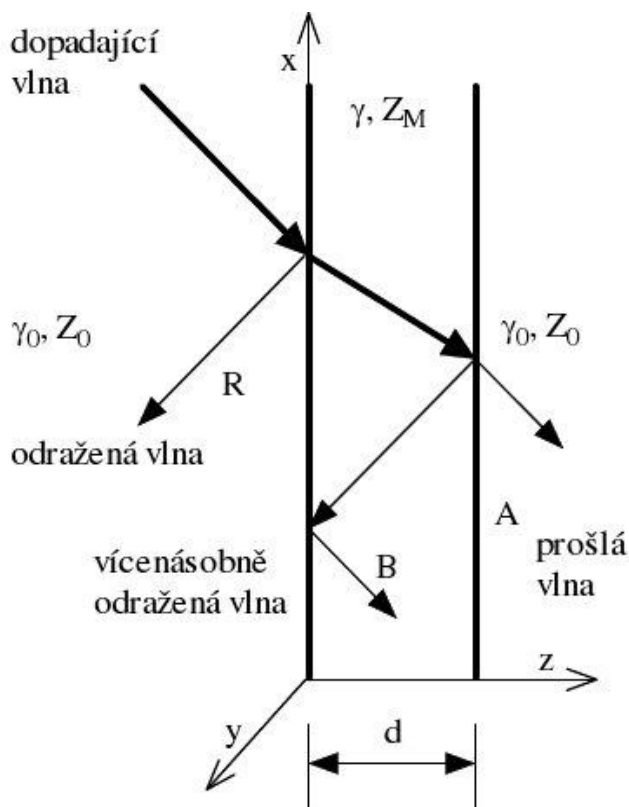
$$\hat{\epsilon}_r = \epsilon_{rr} - j\epsilon_{ri} = \epsilon_r e^{-j\vartheta} \quad (4.27)$$

$$\hat{\epsilon}_r = \epsilon_{rr} - j\frac{\sigma}{\omega} \quad (4.28)$$

kde ϵ_{rr} je reálná složka komplexní relativní permitivity, ϵ_{ri} je její imaginární složka, ϵ_r je absolutní hodnota a ϑ je úhel komplexní relativní permitivity. Reálná složka je mírou kapacitního charakteru dielektrika a imaginární složka je úměrná celkovým ztrátám v dielektriku a nazývá se též ztrátovým číslem.

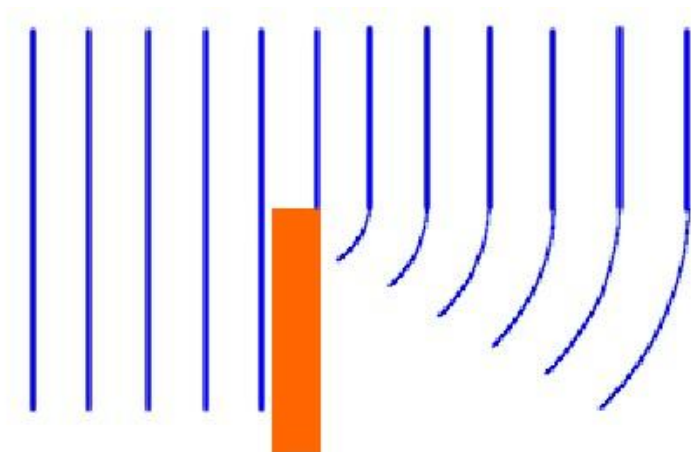
4.6 Odraz a dopad elmag. vln pod úhlem

Zkoumání šíření elektromagnetických vln se výrazně komplikuje v případě, kdy se v prostředí objeví nějaká překážka, rozhraní, nehomogenita. Na nehomogenitě může totiž docházet k odrazu vlny, k rozptylu vlny nebo k difrakci. K odrazu vlny (Obrázek 4.2) dochází, pokud vlna dopadne na dostatečně rozlehlé a dokonale hladké rovinné rozhraní mezi dvěma prostředími s různými elektrickými parametry.



Obrázek 4.2. Dopad vlnění

Není-li rozhraní dokonale hladké, pak se dopadající vlnění odráží v různých místech do různých směrů a odražená vlna v pravém slova smyslu nevzniká. Tento jev se nazývá rozptyl. Jako rozptyl se také označuje vznik nového vlnění na velkém počtu náhodně situovaných částic nebo plošek, které jsou současně ozářeny nějakou dopadající vlnou (rozptyl vlnění na velkém souboru kapek za deště.). Dopadá-li vlnění na těleso, které nemá zřetelně vyjádřenou rozlehlou, rovinnou a hladkou plochu, nedochází sice k odrazu, ale šíření vln je tělesem zřetelně ovlivněno (Obrázek 4.3). Takovýto elektromagnetický jev se nazývá difrakce (ohyb). Většinou si lze dobře představit, že jsou dráhy vln v blízkosti těles zakřivené, takže se vlnění dostává i za těleso (i když samo elektromagnetické vlny vůbec nepropouští).



Obrázek 4.3. Difrakce

4.7 Impedance prostředí

Komplexní číslo

$$\hat{Z} = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{j\omega\varepsilon + \sigma}} \quad (4.29)$$

se nazývá charakteristická impedance prostředí pro úhlový kmitočet ω a značí vztah mezi fázory E a H bez přihlídnutí ke směru obou vektorů. Pole E má směr vektoru $H \times n$, neboli H má směr vektoru $n \times E$. Všechny tyto tři vektory tvoří pravotočivou soustavu v pořadí n, E, H . Šíří-li se tedy vlna kladným směrem z , odpovídá složce E_x složka H_y apod. Mezi oběma vlnami je fázové posunutí určené komplexní impedancí Z . Rovnice 4.29 lze přepsat do obecnějšího tvaru

$$\hat{Z} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}. \quad (4.30)$$

4.8 Dopad rovinné vlny na rozhraní dvou prostředí

Elektromagnetická vlna se často setkává s různými překážkami. Nejjednodušším případem je, pokud dopadá vlna na rovinné rozhraní mezi dvěma prostředími. Postupná dopadající vlna se na rozhraní zčásti odrazí, zčásti proniká do druhého prostředí, v němž se šíří jako vlna postupující. V nejjednodušším případě, kdy se lineárně polarizovaná harmonická rovinná vlna šíří poloprostorem podél osy x a v místě $x = 0$ dopadne kolmo na rozhraní lze vlnu odraženou a pronikající určit ze vztahů

$$\vec{E}_r = R\vec{E}_d \quad (4.31)$$

$$\vec{E}_t = T\vec{E}_d \quad (4.32)$$

kde koeficient odrazu (reflexe) R a koeficient proniku (transmise) T jsou

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (4.33)$$

$$T = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (4.34)$$

kde Z_1 a Z_2 jsou vlnové impedance prvního a druhého prostředí. Dále platí, že

$$1 + R = T. \quad (4.35)$$

4.9 Útlum elektromagnetických vln

Jakákoliv vlna a tudíž i jedna ze složek elektromagnetické vlny (zde elektrická složka) je popsána vztahem

$$\hat{E}(z, t) = E_0 e^{j(\omega t - \frac{\omega}{v}z)} \quad (4.36)$$

kde v je rychlost šíření elektromagnetické vlny, $\omega = 2\pi f$ je úhlová frekvence a f je frekvence, E_0 je amplituda, $\hat{E}(z, t)$ je okamžitá hodnota (amplituda) časově a prostorově proměnného elektrického pole v okamžiku t a v bodě z . Symbolem j je označena imaginární jednotka s vlastností $j^2 = -1$. Pokud nás zajímá jen prostorové rozložení elektrického pole, položíme ve vztahu 4.36 $t = 0$ a dostaneme průběh

$$\hat{E}(z) = E_0 e^{-j\frac{\omega}{v}z}. \quad (4.37)$$

Rychlost šíření elektromagnetické vlny je dána vztahem

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}. \quad (4.38)$$

Pro převrácenou hodnotu rychlosti šíření 4.38 ve ztrátovém prostředí s komplexní permitivitou dostaneme po dosazení ze vztahu 4.27 vztah

$$\frac{1}{v} = \sqrt{\mu\hat{\epsilon}} = \frac{1}{c} \sqrt{\hat{\epsilon}_r} = \frac{1}{c} \sqrt{\epsilon_r} e^{-j\frac{\delta}{2}} = \frac{1}{c} \sqrt{\epsilon_r} \left(\cos \frac{\delta}{2} - j \sin \frac{\delta}{2} \right) \quad (4.39)$$

kde $c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ je rychlost světla ve vakuu.

Po dosazení rovnice 4.39 do rovnice 4.37 zjistíme, že elektrické pole v daném okamžiku má průběh

$$\hat{E}(z) = E_0 e^{(-j\frac{\omega}{c}\sqrt{\epsilon_r} \cos \frac{\delta}{2} z) - (\frac{\omega}{c}\sqrt{\epsilon_r} \sin \frac{\delta}{2} z)}. \quad (4.40)$$

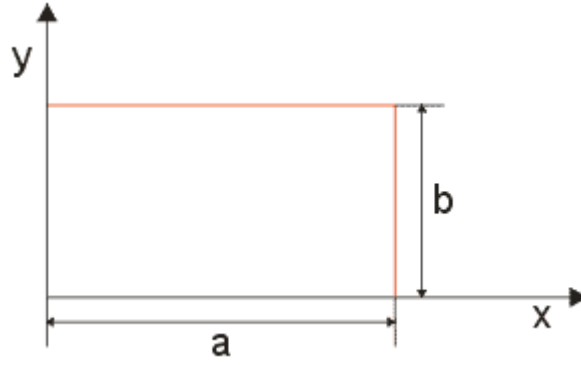
5 Vlnovody

Pro přenos/šíření elektromagnetického vlnění se užívá okrem otevřeného prostoru také uzavřených vedení. Mezi ně patří např. vlnovody, koaxiální vedení, pásková vedení a další. Při zpracování práce využijeme vlnovod a tak se blíže podíváme na tento typ vedení.

Vlnovodem je kovová trubka s libovolným tvarem příčného průřezu konstruována z vodivých nebo dielektrických materiálů, jejichž plášť je tvořen dobře vodivým materiálem. Nejčastěji se používá kovový obdélníkový vlnovod. Vlnovody lze konstruovat pro přenos vln v široké části elektromagnetického spektra. Obzvláště užitečné jsou pak pro frekvence od stovek MHz do cca 100 GHz. Přenáší se jimi jak energie, tak také komunikační signály. Při šíření elektromagnetické vlny ve vlnovodu, mají vlny také podélnou složku elektrického nebo magnetického pole (na rozdíl od vln šířících se volným prostorem).

5.1 Vlastnosti obdélníkové vlnovodu

Vlnovod má určitou šířku a a výšku b (Obrázek 5.1). Pro zjednodušení se předpokládá, že jeho stěny jsou ideálně vodivé ($\sigma \rightarrow \infty$).



Obrázek 5.1. Rozměry vlnovodu

Vlny s možností šířit se tímto vlnovodem jsou následující vidy:

- TE (transverzálně elektrický) – nemají žádné elektrické pole ve směru šíření.
- TM (transverzálně magnetický) – nemají žádné magnetické pole ve směru šíření.
- Hybridní vidy HE, EH jsou ty, které mají jak elektrickou tak magnetickou složku pole ve směru šíření.

Dále se budeme zabývat videm TE_{mn} s konstantou příčného průřezu

$$k_{c,mn} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}. \quad (5.01)$$

Rozložení elektromagnetického pole vlny TE_{mn} je dáno vztahy

$$E_x = \frac{j\omega\mu}{k_{c,mn}^2} \frac{n\pi}{b} H_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-j\beta z} \quad (5.02)$$

$$E_y = -\frac{j\omega\mu}{k_{c,mn}^2} \frac{m\pi}{a} H_0 \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-j\beta z} \quad (5.03)$$

$$E_z = 0 \quad (5.04)$$

$$H_x = \frac{j\beta}{k_{c,mn}^2} \frac{m\pi}{a} H_0 \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-j\beta z} \quad (5.05)$$

$$H_y = \frac{j\beta}{k_{c,mn}^2} \frac{n\pi}{b} H_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-j\beta z} \quad (5.06)$$

$$H_z = H_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) e^{-j\beta z}. \quad (5.07)$$

Z rovnic je patrna možnost budit velké množství vidů. Pro přenos energie se nejčastěji užívá jeden vid, neboť umožňuje přenos velkých výkonů, při dané frekvenci jde dosáhnout nejmenších rozměrů vlnovodu a nepotřebuje vidový filtr. V dalších

vzorcích se budeme zabývat dominantním videm TE_{10} , protože je využit při měření. Konstanta příčného průřezu bude v tomto případě

$$k_{c,10} = \frac{\pi}{a}. \quad (5.08)$$

Mezní kmitočet dominantního vidu $f_{c,10}$ je dán následujícím vztahem

$$f_{c,10} = \frac{c_0 k_{c,10}}{2\pi\sqrt{\epsilon_r\mu_r}} = \frac{c_0}{2a\sqrt{\epsilon_r\mu_r}}. \quad (5.09)$$

Složky intenzit elektromagnetického pole vlny TE_{10} jsou dány vztahy

$$E_x = 0 \quad (5.10)$$

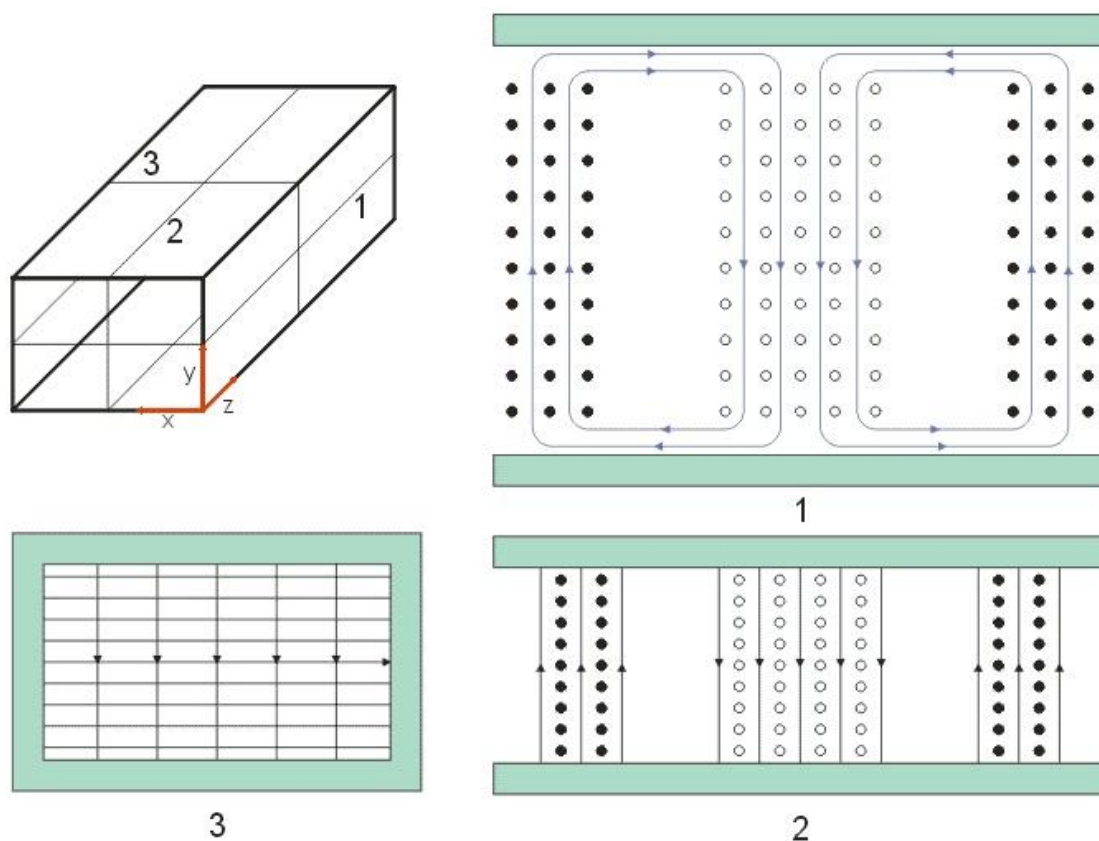
$$E_y = -\frac{j\omega\mu a}{\pi} H_0 \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) e^{-j\beta z} \quad (5.11)$$

$$E_z = 0 \quad (5.12)$$

$$H_x = \frac{j\beta a}{\pi} H_0 \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) e^{-j\beta z} \quad (5.13)$$

$$H_y = 0 \quad (5.14)$$

$$H_z = H_0 \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) e^{-j\beta z}. \quad (5.15)$$



Obrázek 5.2. Siločáry, 1 - rozložení siločar v rovině xz, 2 - rozložení siločar v rovině yz, 3 - rozložení siločar v rovině xy

Na obrázku 14 je vyobrazeno rozložení elektromagnetického pole v obdélníkovém vlnovodu s videm TE_{10} . Jak je z výše uvedených vzorců vidět jedná se o vyobrazení nenulových složek intenzity pole E_y , H_x a H_z .

6 Bezpečnost

Biologické účinky elektromagnetických vln jsou předmětem výzkumů v mnoha zemích včetně ČR již více než 20 let. Jedná se ale o velmi složitou problematiku, proto do ukončení a vyhodnocení těchto studií zbývá ještě hodně práce.

Realizace a zhodnocení výsledků mnohých experimentů pro studium biologických účinků elektromagnetického pole je navíc komplikováno nemožností aplikace těchto pokusů na lidi. Proto se experimentuje na zvířatech. Zjištěné účinky se ale nedají vždy přímočaře a jednoznačně přenést do humánní medicíny.

6.1 Biologické účinky

Realizace experimentů tohoto druhu není jednoduchá, zabránit rušivým vlivům je často obtížné až nemožné. Absorpce a tedy i účinky jsou ve skutečnosti výrazně závislé na vlastnostech biologických tkání, a to zejména na těchto faktorech:

- dielektrické vlastnosti tkáně,
- geometrický tvar a rozměry tkáně,
- trojrozměrné nehomogenní prostorové rozložení tkáně,
- orientace a polarizace EM pole,
- kmitočet EM pole,
- zdroje vyzařování EM pole,
- podmínky ozáření,
- délka trvání experimentu,
- ozáření trvalé nebo dle časového schématu,
- intenzita elektrického resp. magnetického pole.

V odborné literatuře bývá zvykem dělit biologické účinky na tepelné a netepelné podle následujících kritérií.

6.1.1 Netepelné účinky

Netepelné účinky jsou vlastně skutečné účinky elektromagnetického pole, a to i při velmi nízké energetické úrovni, kdy nedochází k absorpci většího výkonu a tedy ani ke zvýšení teploty sledované biologické tkáně. Studium vlivu elektromagnetického pole na buňku „in vitro“ se zatím neprokázaly škodlivé účinky na enzymy, DNA, buněčnou membránu, ani na jiné části buněk. Může však dojít k ovlivnění transportu vápníku, sodíku nebo draslíku, ovlivnění neurotransmiterových systémů či oslabení krevních stěn v mozku. Mohou se objevit individuálně pociťované potíže, jako poruchy paměti, stres, ovlivnění spánku, změny krevního tlaku nebo ovlivnění pozornosti řidiče. Hygienické normy zatím nezohledňují netepelné vlivy záření.

6.1.2 Tepelné účinky

Jsou chápány jako projev nuceně zvýšené teploty při absorpci vyšší úrovně elektromagnetické energie, při které již dojde k ohřevu biologické tkáně. Těchto účinků se využívá u dříve zmíněných variant termoterapie. Ve skutečnosti mohou být tyto tepelné účinky provázené i s vlastními účinky elektromagnetického pole. Obecně je pak velmi náročné odděleně vyhodnotit výsledný efekt tepelných a netepelných účinků.

6.2 Vhodné veličiny pro definici hygienických norem

Konkrétním výsledkem dosavadního výzkumu jsou hygienické normy, které určují maximální hodnoty intenzity elektrického pole nebo maximální hodnoty dopadajícího (resp. absorbovaného) výkonu, jejichž působení smí být člověk vystaven, bez toho aby došlo k nějakému ohrožení jeho zdraví. Tyto normy se v různých zemích zatím poněkud liší, ale v rámci mezinárodních výzkumných programů se snaží o jejich sjednocení.

Pro porovnání působení elektromagnetického pole na živé organismy je potřeba najít vhodnou veličinu. V současné době se nejvíce užívá následujících veličin.

- Hustota dopadajícího výkonu: p [W/m²]

Veličina vhodná pro mikrovlnnou část kmitočtového spektra. Lze ji dobře měřit, ale sama o sobě nedefinuje vystavení biologické tkáně elektromagnetickým polem dost přesně. Část dopadající energie se totiž od biologické tkáně odrazí, takže z dopadající energie se dostane do tkáně jen jeho část. Tato veličina je využívána v naší hygienické normě.

- SAR (Specific Absorption Rate) [W/kg]

Jde o výkon absorbovaný na 1 kg tkáně. Tato veličina velmi přesně definuje velikost expozice biologické tkáně elektromagnetickým polem, ale obtížněji se měří. Zavádí a využívá ji norma USA vydaná ANSI (American National Standard Institute).

- ARD (Absorption Rate Density) [W/m³]

Je veličina svojí povahou blízká veličině SAR. Fyzikálně jde o absorbovaný výkon na jednotce objemu.

- Intenzita elektrického pole: E [V/m]

Veličina vhodná spíše pro vyjádření účinku elektromagnetického pole pro rozsah působení od stejnosměrné veličiny až po oblast radiotechnických kmitočtů (tj. asi do 300 MHz). Přepočet na hustotu výkonu lze vyjádřit jako

$$p = \frac{|E(x,y,z)|^2}{120\pi}. \quad (7.01)$$

- Intenzita magnetického pole: H [A/m]

Analogicky k předchozí veličině se někdy sleduje vliv prostorového rozložení intenzity magnetického pole

$$p = 120\pi|H(x,y,z)|^2. \quad (7.02)$$

- Proudová hustota: J [A/m²]

Mezi další často používané veličiny patří proudová hustota. Dle teorie elektromagnetického pole platí známý vztah

$$J = \sigma E. \quad (7.03)$$

Proudovou hustotu tedy můžeme určit ze známého rozložení intenzity elektromagnetického pole a vodivosti biologické tkáně ve studované oblasti.

Elektromagnetickou energii absorbovanou v biologické tkáni nejlépe vyjadřuje veličina SAR. Tato veličina se ale velmi obtížně měří prostorově přímo v živém organismu, spíše lze určit jen v několika vybraných bodech.

Často se tak musíme omezit na měření veličin v nedalekém okolí živého organismu, nejlépe na měření intenzity elektromagnetického pole E nebo na měření hustoty výkonu p dopadající elektromagnetické vlny.

6.3 Hygienické normy

Hygienické normy, jinak výnosy či směrnice hygieniků, jsou nezbytnou informací pro zajištění ochrany lidí před nežádoucími účinky elektromagnetického pole. Užívá se též výrazu ochrana před ozářením elektromagnetickým polem. Je nutné

věnovat těmto normám zvýšenou pozornost. Mimo to je však třeba také věnovat pozornost metodice a přístrojovému vybavení měření výše uvedených veličin.

6.3.1 Hygienická norma podle ANSI

Ve Spojených Státech Amerických dospěli k názoru, že hranice bezpečné pohlcení elektromagnetické energie biologickou tkání přibližně odpovídá úrovni $SAR = 4 \text{ W/kg}$. Při vyšší úrovni záření dochází ke zvyšování teploty vystavené biologické tkáně. Pro dosažení bezpečnostního faktoru 10x pak byla zvolena mez hygienické normy $SAR = 0,4 \text{ W/kg}$. Norma má výrazně přísnější požadavky na hodnoty limitu ve frekvenčním intervalu 30 až 300 MHz. Pokud lidské tělo zjednodušeně interpretujeme jako dipól, pak v tomto frekvenčním pásmu dochází k jeho rezonanci. Právě při rezonanci by se mohla vstřebaná energie několikanásobně zvýšit, proto je v této frekvenční oblasti norma mnohem přísnější.

6.3.2 Výnos hlavního hygienika ČR z roku 1990

Výnos hlavního hygienika určuje dávku působení elektromagnetického pole na biologickou tkáň resp. živé organismy jako součin hustoty výkonu elektromagnetického pole s dobou jeho působení. Radiofrekvenční a mikrovlnné frekvenční pásmo je pak rozděleno do tří kmitočtových pásem, ve kterých jsou definovány maximální přípustné hodnoty výše zmíněného součinu $(|E|^2 t)_{\max}$ nebo $(pt)_{\max}$. Následující tabulka uvádí snesitelné hodnoty ozáření elektromagnetickým polem platné pro obyvatelstvo, které není pravidelně kontrolováno lékařem.

Tabulka 6.1. Snesitelné ozáření obyvatelstva

Kmitočtové pásmo [MHz]	$(E ^2 t)_{\max} [(\text{V/m})^2 \cdot \text{h}]$	$(pt)_{\max} [\text{mW} \cdot \text{h} \cdot \text{cm}^{-2}]$
$f < 30$	700	1,87
$30 < f < 300$	100	0,27
$300 < f$	45	0,12

Vyšší přípustné hodnoty ozáření elektromagnetickým polem pro pracovníky obsluhující mikrovlnná zařízení, kteří proto pravidelně prochází lékařskou kontrolou, uvádí následující tabulka přípustné denní resp. směnové dávky mikrovlnného záření.

Tabulka 6.2. Přípustné ozáření pracovníků

Kmitočtové pásmo [MHz]	$(E ^2 t)_{\max} [(V/m)^2 \cdot h]$	$(pt)_{\max} [mW \cdot h \cdot cm^{-2}]$
$f < 30$	7000	18,7
$30 < f < 300$	800	2,16
$300 < f$	300	0,8

Také se ve výnosu hlavního hygienika ČR uvádí nepřekročitelné limity pro okamžité hodnoty veličin E_{\max} a p_{\max} . V první tabulce jsou uvedeny hodnoty pro obyvatelstvo a ve druhé pro lékařsky kontrolovanou skupinu lidí pracujících na vysokofrekvenčních výkonových zařízeních.

Tabulka 6.3. Nepřekročitelné limity ozáření obyvatelstva

Kmitočtové pásmo [MHz]	$E_{\max} [V/m]$	$p_{\max} [mW \cdot cm^{-2}]$
$f < 30$	80	17
$30 < f < 300$	30	2,4
$300 < f$	10	0,25

Tabulka 6.4. Nepřekročitelné limity ozáření pracovníků

Kmitočtové pásmo [MHz]	$E_{\max} [V/m]$	$p_{\max} [mW \cdot cm^{-2}]$
$f < 30$	300	238
$30 < f < 300$	100	26,5
$300 < f$	31,6	2,65

6.3.3 Nařízení vlády č. 480/2000 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením

Nejvyšší přípustné hodnoty proudové hustoty indukované v hlavě a trupu elektrickým a magnetickým polem jsou stanoveny pro osoby vystavené při výkonu práce („zaměstnanci“) a pro exponované osoby s výjimkou zaměstnanců a osob vystavených tomuto záření při léčebných procedurách („ostatní osoby“) v následující tabulce.

Tabulka 6.5. Nejvyšší přípustné hodnoty J

Indukovaná proudová hustota J - nejvyšší přípustné hodnoty			
Zaměstnanci		Ostatní osoby	
frekvence f [Hz]	J [A.m ⁻²]	frekvence f [Hz]	J [A.m ⁻²]
< 1	0,057	< 1	0,011
1 – 4	0,04 / f	1 – 4	0,008 / f
4 – 1000	0,01	4 – 1000	0,002
1000 – 10 ⁵	f / 10 ⁵	1000 – 10 ⁵	f / 5.10 ⁵
10 ⁵ – 10 ⁷	f / 10 ⁵	10 ⁵ – 10 ⁷	f / 5.10 ⁵

Nejvyšší přípustné hodnoty měrného absorbovaného výkonu (SAR) a měrné absorbované energie (SA) jsou uvedeny v následující tabulce. Uvedené maximální přípustné hodnoty se vztahují na celkovou absorpci všech přítomných složek elektromagnetického pole v tkáních těla.

Tabulka 6.6. Nejvyšší přípustné hodnoty SAR a SA

Měrný absorbovaný výkon (SAR) a měrná absorbovaná energie (SA) – – nejvyšší přípustné hodnoty				
Platí pro frekvence od 100 kHz do 10 GHz	Měrný absorbovaný výkon - SAR - středovaný pro kterýkoli šestiminutový interval a celé tělo	SAR středovaný pro kterýkoli šestiminutový interval a pro kterýchkoli 10 g tkáně s výjimkou rukou, zápěstí, chodidel a kotníků	SAR středovaný pro kterýkoli šestiminutový interval a pro kterýchkoli 10 g tkáně rukou, zápěstí, chodidel a kotníků	Špičková hodnota měrné absorbované energie SA středovaná pro kterýchkoli 10 g tkáně
Zaměstnanci	0,4 W/kg	10 W/kg	20 W/kg	0,01 J/kg
Ostatní osoby	0,08 W/kg	2 W/kg	4 W/kg	0,002 J/kg

Nejvyšší přípustné hodnoty pro hustotu zářivého toku elektromagnetické vlny z rozmezí frekvencí od 10 GHz do 300 GHz, dopadající na tělo nebo na jeho část, jsou stanoveny v následující tabulce.

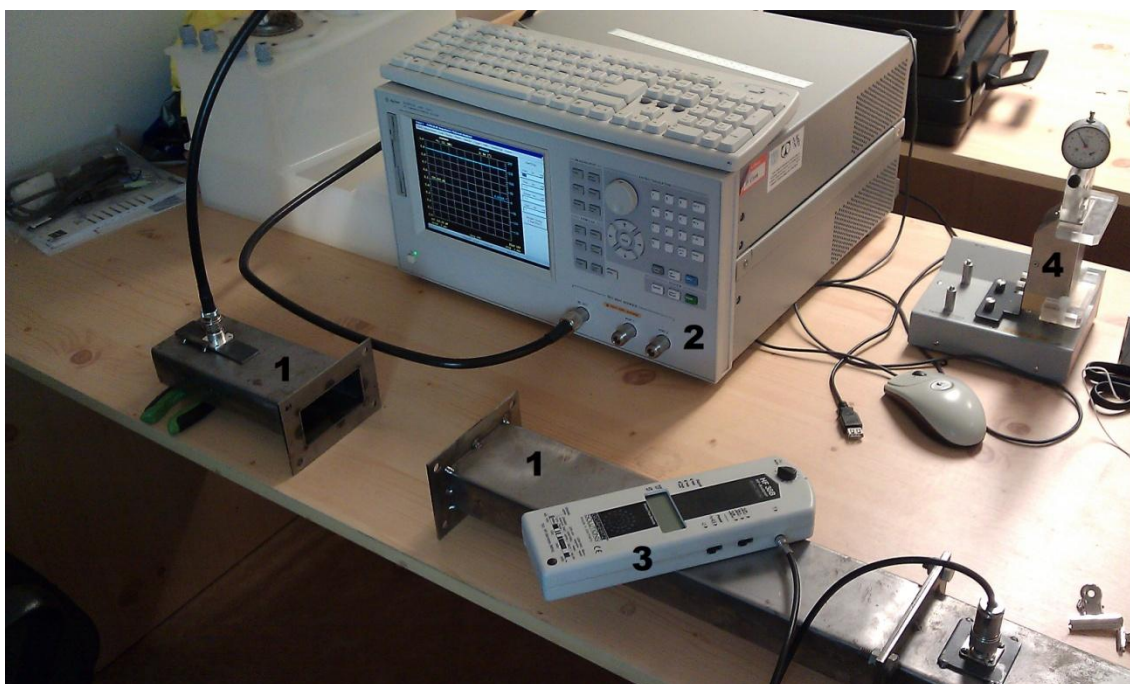
Tabulka 6.7. Nejvyšší přípustné hodnoty S

Hustota zářivého toku S - nejvyšší přípustné hodnoty			
Zaměstnanci		Ostatní osoby	
frekvence f [Hz]	S [W.m ⁻²]	frekvence f [Hz]	S [W.m ⁻²]
10 ¹⁰ - 3.10 ¹¹	50	10 ¹⁰ - 3.10 ¹¹	10

7 Praktická část

7.1 Měření ve vlnovodu

Prvním pokusem bylo měření útlumu biologických materiálů ve vlnovodu. Vid TE_{10} jsme budili ve vlnovodu (na Obrázku 7.1) s rozměry $a = 80$ mm a $b = 40$ mm s mezní frekvencí $f_{k,10} = 1,875$ GHz. Rozsah frekvencí, pro které jsme měřili útlum, byl



Obrázek 7.1 Měřicí pracoviště,

1 – vlnovod, 2 – analyzátor Agilent E4991A, 3 – analyzátor Gygahertz solution HF 38 B, 4 – 16453A Dielectric Material Test Fixture

od 1,9 GHz do 3 GHz s krokem 50 MHz a kvůli navržení vlnovodu pro frekvenci 2,4 GHz jsme se rozhodli zmenšit krokovací frekvenci na 10 MHz mezi frekvencemi 2,3 GHz a 2,5 GHz. Jako zdroj těchto frekvencí jsme použili analyzátor Agilent E4991A (na Obrázku 7.1), vysílací napětí bylo nastaveno na 100 mV. Měřeno bylo pomocí přístroje Gygahertz solution HF 38 B (také na Obrázek 7.1).

7.1.1 Příprava

Jako biologický materiál jsme užili vepřové kýty bez kosti ve dvou tloušťkách (1 cm a 2,5 cm, Obrázek 16) a vyzkoušeli jsme také měřit útlum agarového fantomu (složení – 4 % agar, 96 % 0,33% roztok NaCl). Jak maso, tak fantomy byly uloženy do plastových pytlíků (Obrázek 7.4), kvůli hygieně a u fantomů také pro udržení tvaru. Maso bylo uloženo přímo do vlnovodu, kdežto fantomy byly vtěsnány mezi příruby vlnovodů (viz Obrázek 7.5).



Obrázek 7.2. Plátek vepřového masa 1 cm



Obrázek 7.3. Plátek vepřového masa 2,5 cm



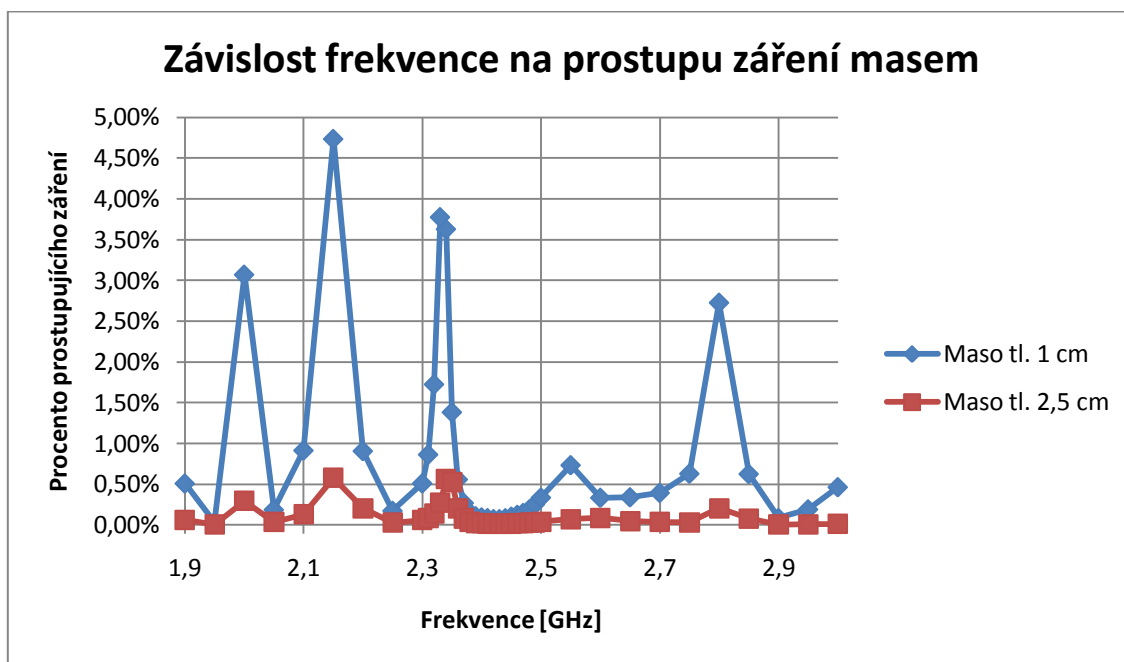
Obrázek 7.4. Vepřové ve vlnovodu



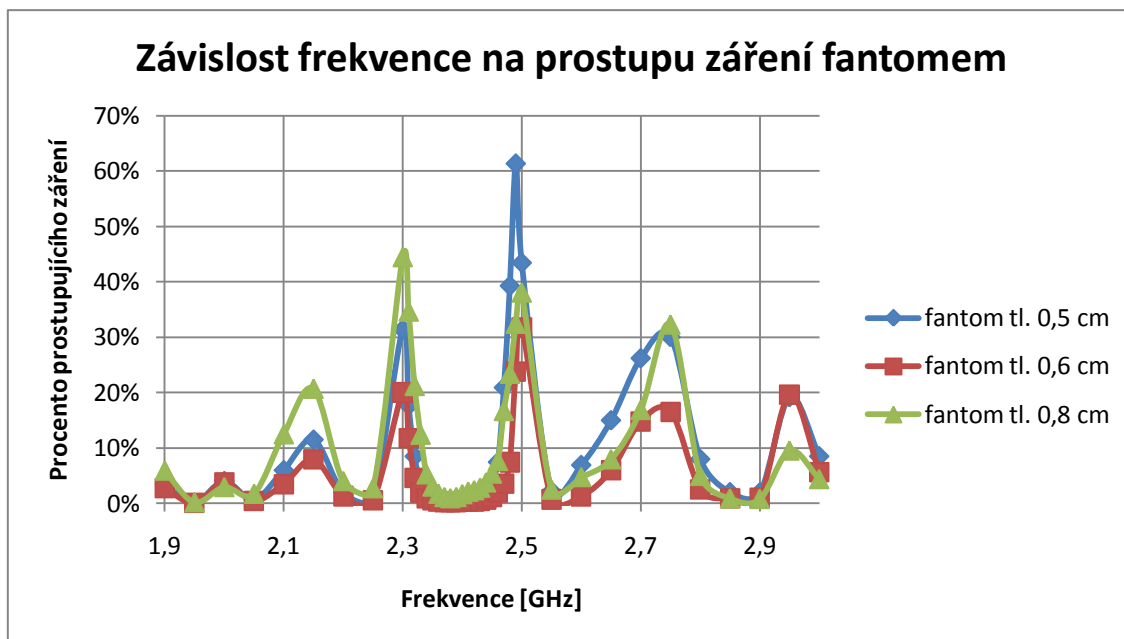
Obrázek 7.5. Sevřený fantom

7.1.2 Výsledky

Následující grafy zobrazují procento prostoupivší elektromagnetické energie, přitom v prvním grafu jsou zobrazeny výsledky pro vepřové maso ve dvou tloušťkách (Obrázek 7.6) a ve druhém pro fantomy o třech různých tloušťkách (Obrázky 7.7).



Obrázek 7.6. Graf závislosti frekvence na prostupu záření masem



Obrázek 7.7. Graf závislosti frekvence na prostupu záření fantomem

7.2 Měření na materiálovém analyzátoru

Druhým měřením bylo měření pomocí analyzátoru Agilent E4991A (na Obrázku 7.1) a jeho příslušenství v podobě 16453A Dielectric Material Test Fixture (Obrázek 7.1) a následné zpracování naměřených hodnot permitivity jednotlivých vzorků pomocí aplikace Matlab.

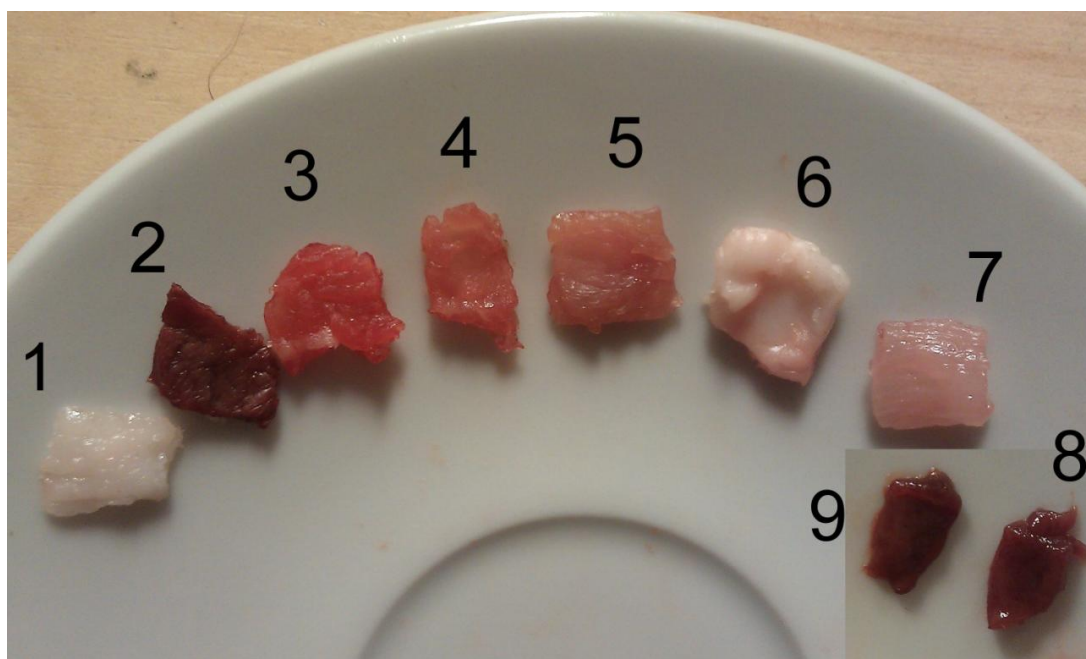
7.2.1 Příprava

V masně jsme nakoupili vzorky různých druhů biologických tkání: bůček (použili jsme jak jeho maso, tak tuk), hovězí zadní, krůtí, kuřecí prsa, vepřová játra, v. ledviny, v. sádlo, v. srdce a vepřovou kýtu bez kosti. Z každého jsme oddělili vzorek (Obrázek 7.8) do maximálního rozměru: výška – 2 mm, šířka – 4 mm, pro zabránění zkratování elektrod v testovacím přípravku.

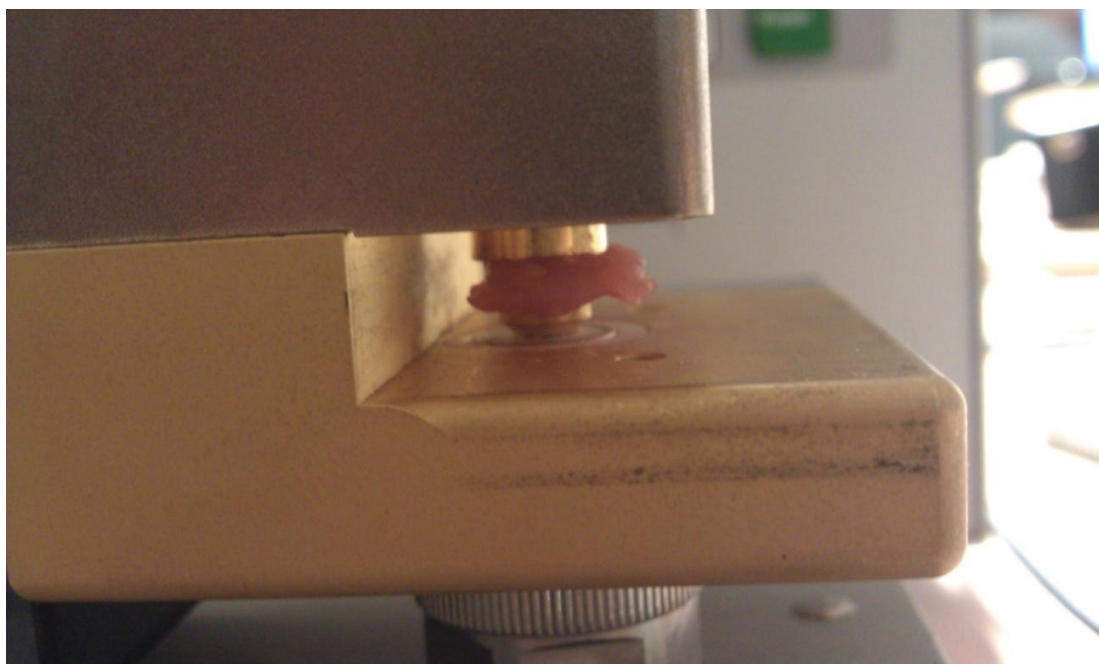
7.2.2 Měření a zpracování

Přístroj jsme nakalibrovali podle dodávaného etalonu a nastavili rozsah frekvencí, pro který se bude měřit, kvantování frekvenčního rozsahu, a vysílací napětí 100 mV. Jednotlivé vzorky tkáně jsme postupně upínali do přípravku, změřili jejich tloušťku a po jejím nastavení v přístroji spustili měření. Výsledky měření byly ukládány do textového souboru.

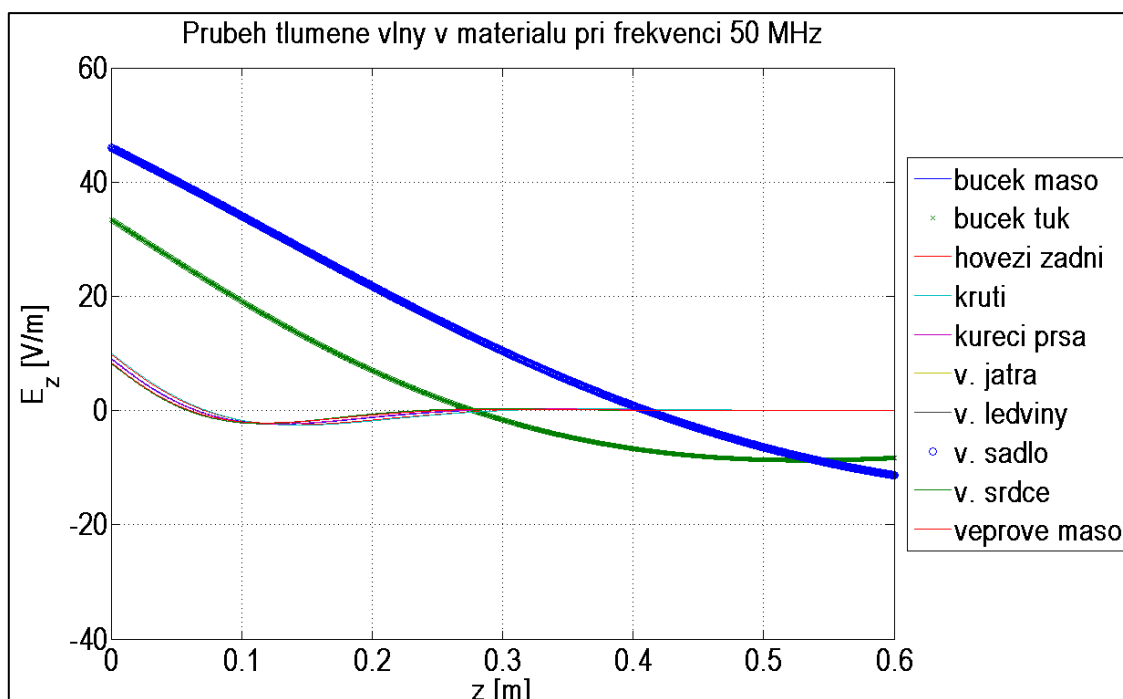
Všechny textové soubory s naměřenými hodnotami jsme upravili pro použití v programu Matlab a poté je načetli pomocí upravených programů, které byli k dispozici. Tyto programy vypočítaly vybrané fyzikální hodnoty měřeného elektromagnetického vlnění (průběh vlny v materiálu, odraz, útlum, hloubku vniku a komplexní permitivitu) a poté vyobrazil názorné grafy. Některé z nich jsou zobrazeny níže, zbytek je ve formě přílohy.



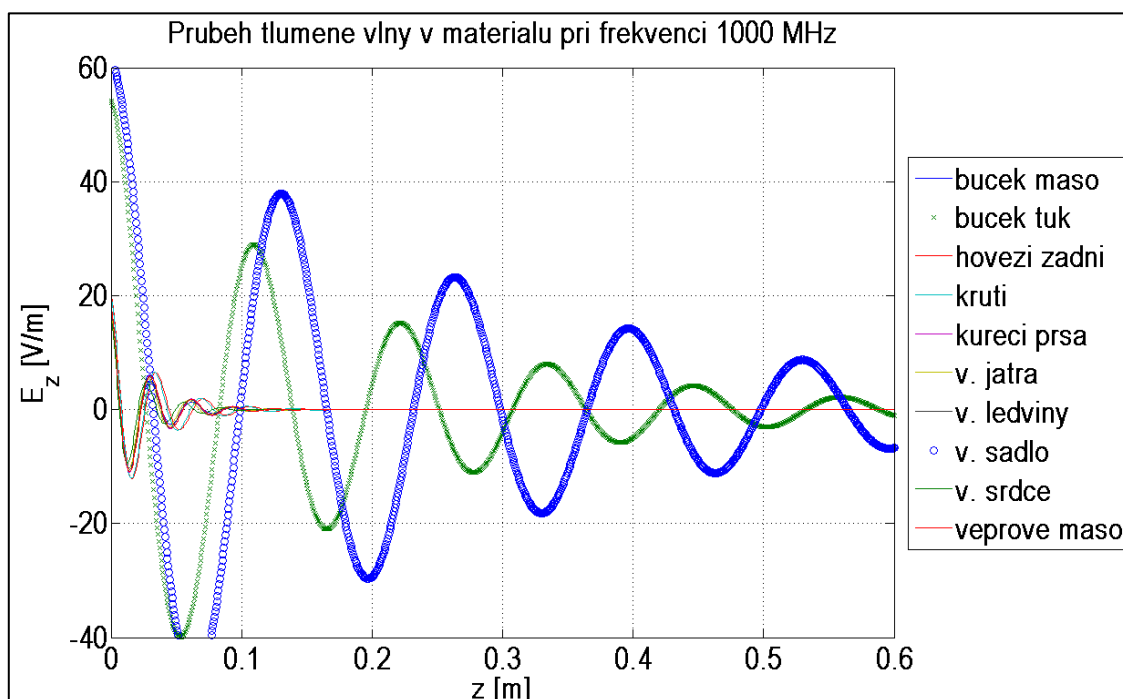
Obrázek 7.8. Vzorky tkání,
1– v. sádlo, 2– v. srdce, 3– hovězí zadní, 4– krůtí, 5– bůček maso, 6– bůček tuk, 7– kuřecí prsa, 8– v. játra, 9– v. ledvinky



Obrázek 7.9. Čelisti analyzátoru



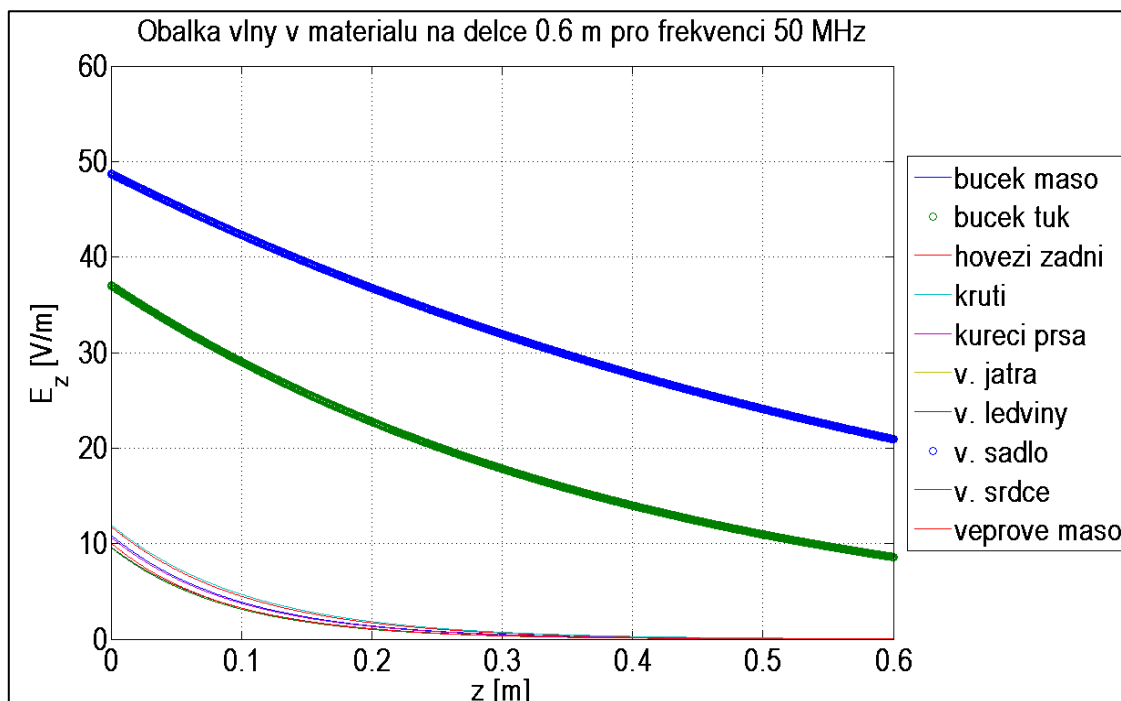
Obrázek 7.10. Graf tlumené vlny v materiálu při frekvenci 50 MHz



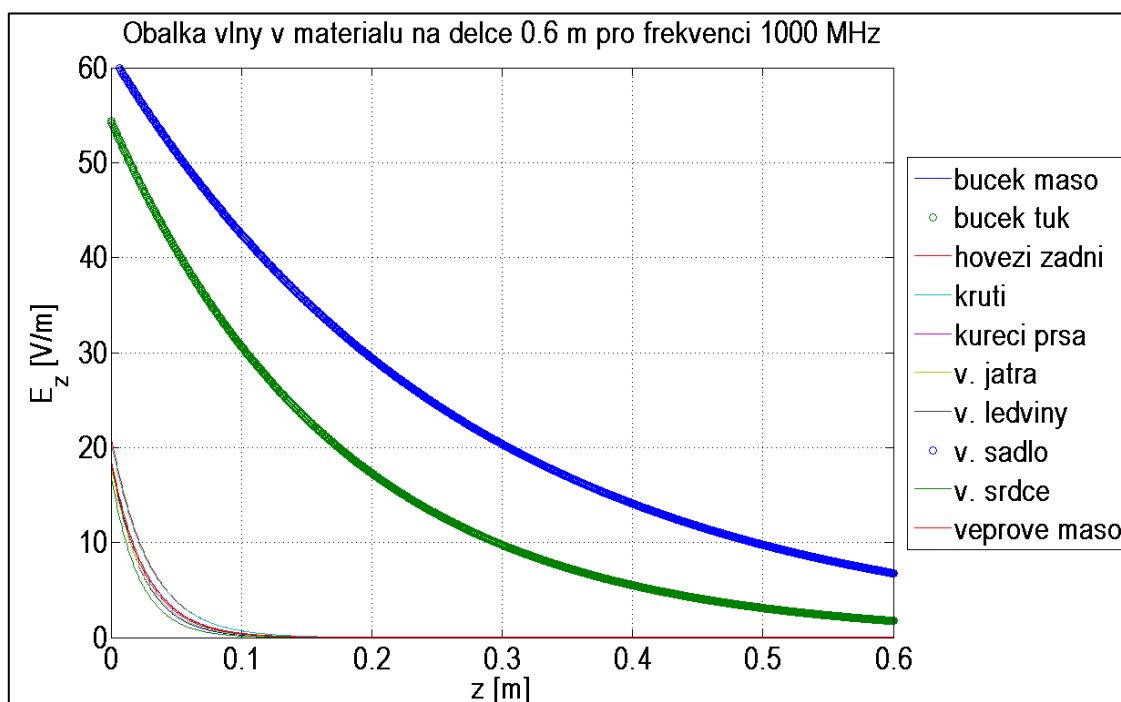
Obrázek 7.11. Graf tlumené vlny v materiálu při frekvenci 1 GHz

Při porovnání grafů (Obrázky 7.11 a 7.12), je vidět rozdílný odraz tkání pro nízké a vysoké frekvence, kdy při frekvenci 50 MHz vstupuje amplituda okolo 40 V/m pro tukové tkáně a 10 V/m pro jiné tkáně. Zároveň je patrný rozdíl útlumu pro tukovou a ostatní tkáň. Na prvním grafu je prostupná vlna v jiných než tukových tkáních utlumena již v tloušťce 40 cm, kdežto v tukové tkáni se vlna utlumí až mimo hodnoty

grafu. Na druhém grafu jsou tyto hodnoty nižší a to i přesto, že je vstupující amplituda vyšší.

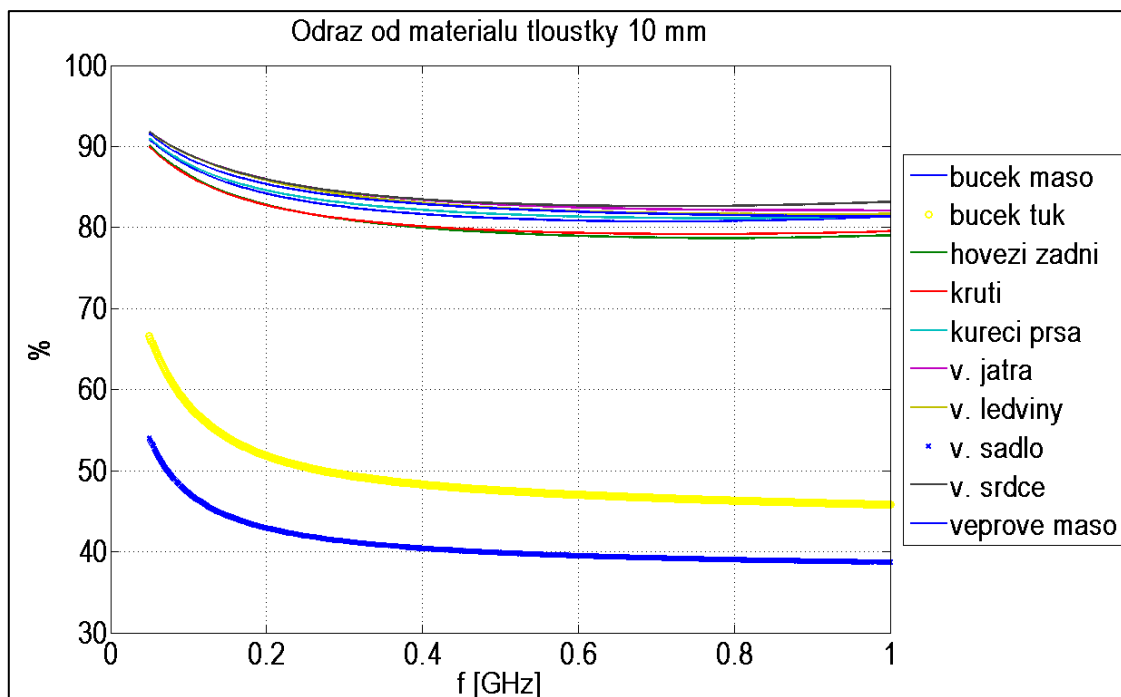


Obrázek 7.12. Graf obálky vlny v materiálu na délce 0,6 m pro frekvenci 50 MHz

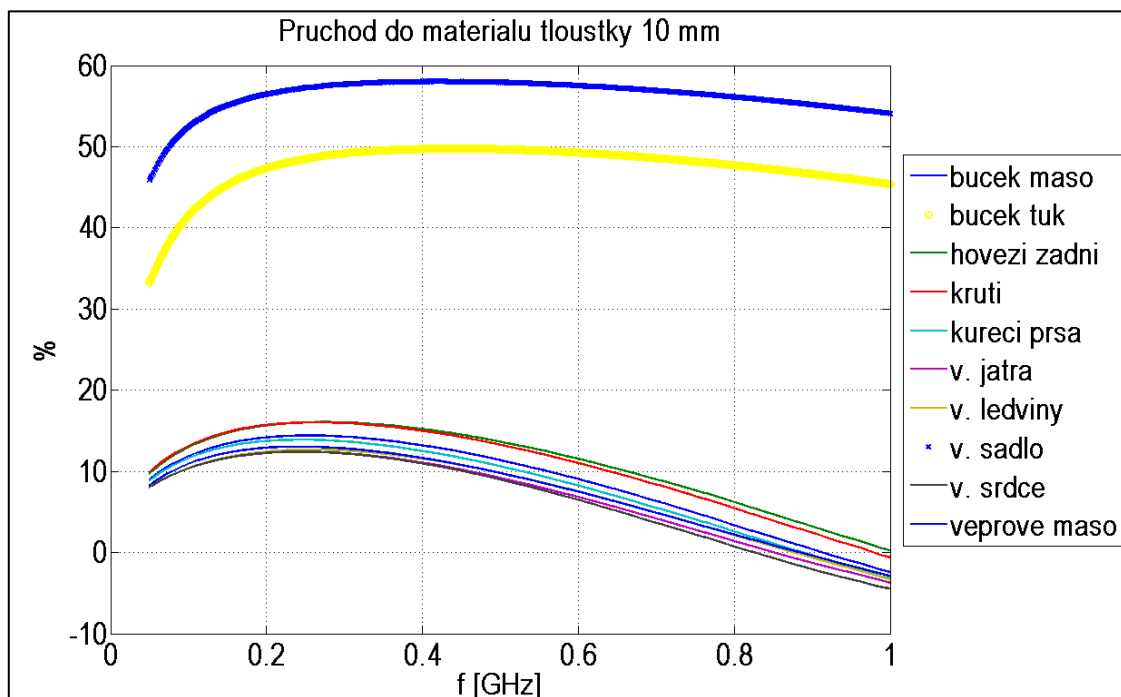


Obrázek 7.13. Graf obálky vlny v materiálu na délce 0,6 m pro frekvenci 1 GHz

Grafy na obrázcích 7.13 a 7.14 zobrazují obálku tlumené vlny v materiálu. Na těchto grafech je opět vidět vysoký útlum pro elektromagnetické záření v měřených netukových tkáních.

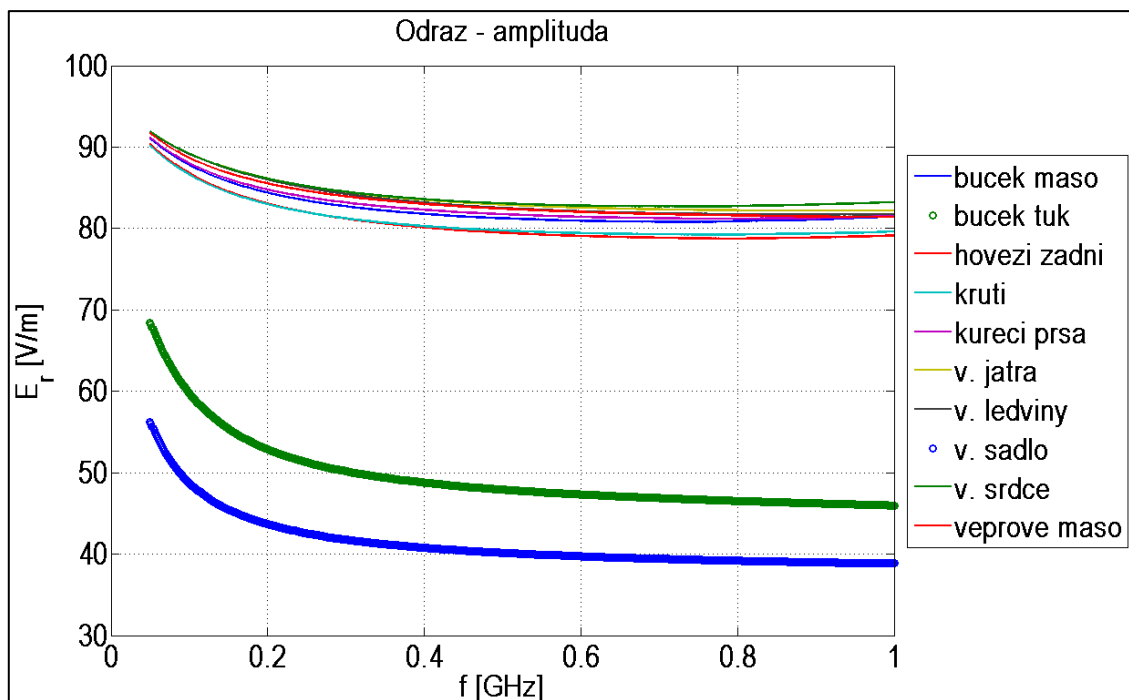


Obrázek 7.14. Graf odrazu vlny od materiálu tloušťky 10 mm

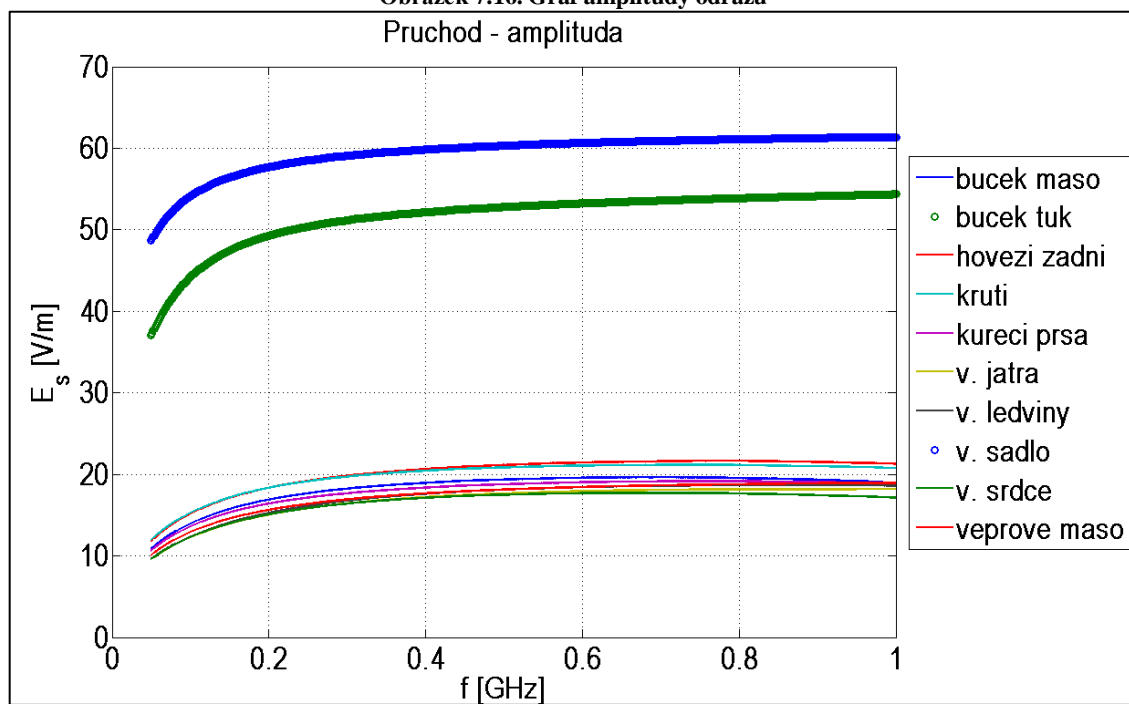


Obrázek 7.15. Graf průchodu vlny do materiálu tloušťky 10 mm

Na grafu (Obrázek 7.15) je procentuálně vyjádřen odraz od měřených materiálů pro jednotlivé frekvence měřeného spektra. Stejně jako na všech grafech i zde je patrný rozdíl mezi tukovými tkáněmi a ostatními měřeními. Je také vidět rozdíl mezi tukem z bůčku a sádlem, které je koncentrovanější. Další graf (Obrázek 7.16) zobrazuje průchozí procento záření do materiálu.

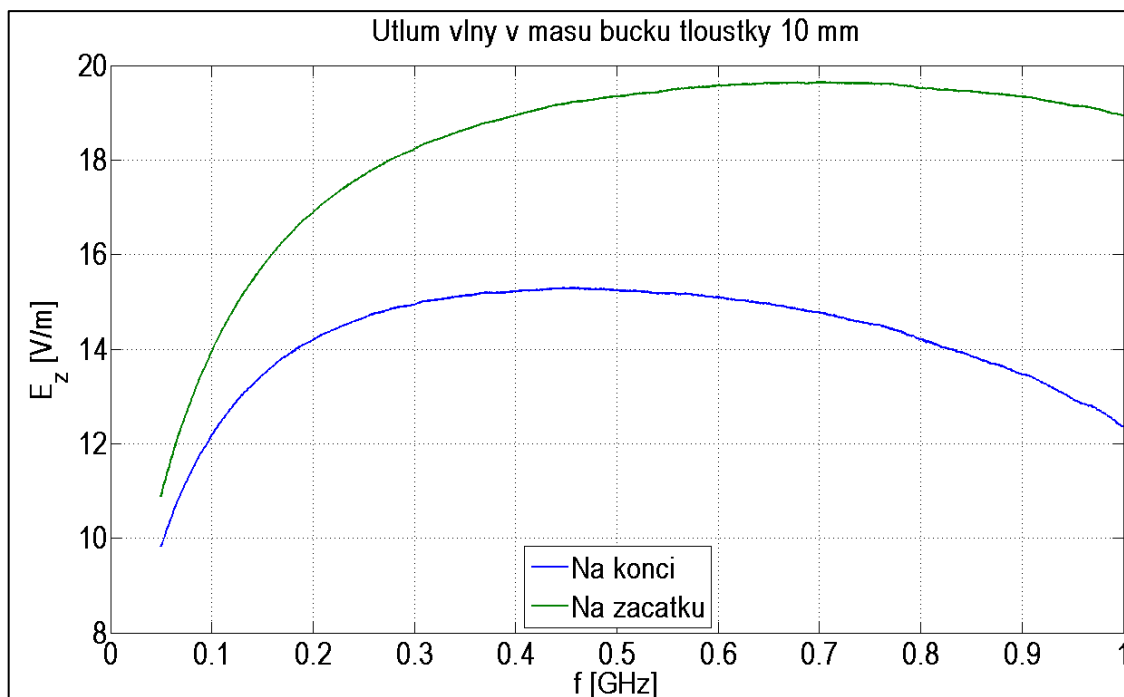


Obrázek 7.16. Graf amplitudy odrazu

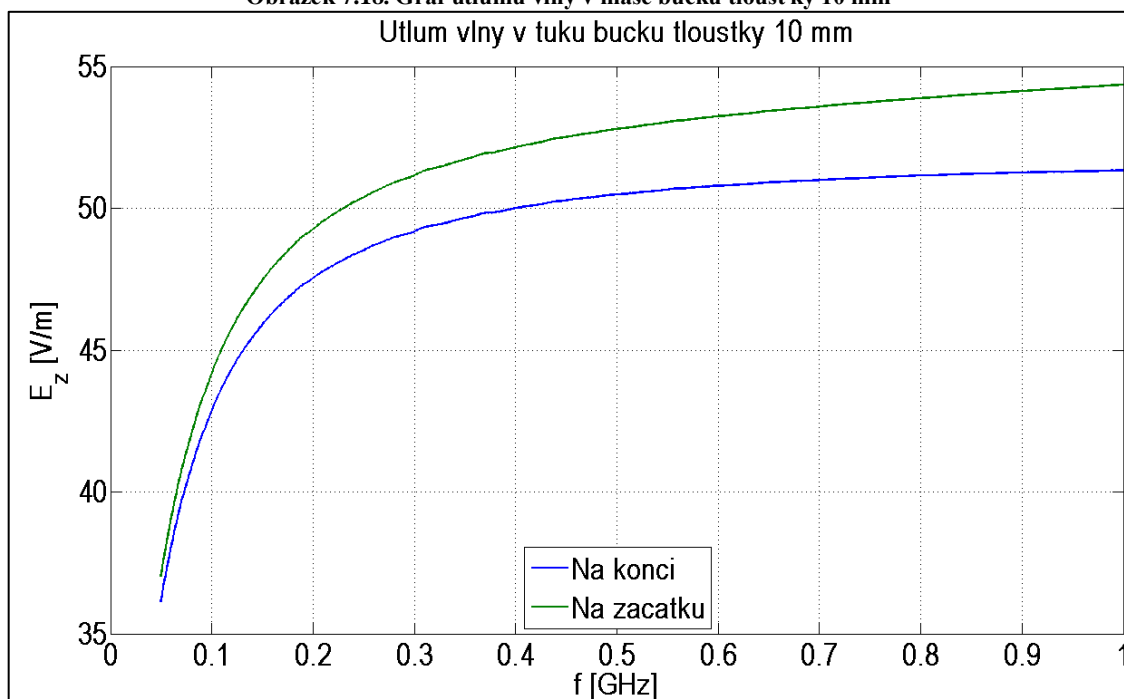


Obrázek 7.17. Graf amplitudy průchozí

Výše vykreslené grafy (Obrázky 7.17 a 7.18) zobrazují stejnou informaci jako grafy 7.15 a 7.16, ale vyjádřené číselnými hodnotami.

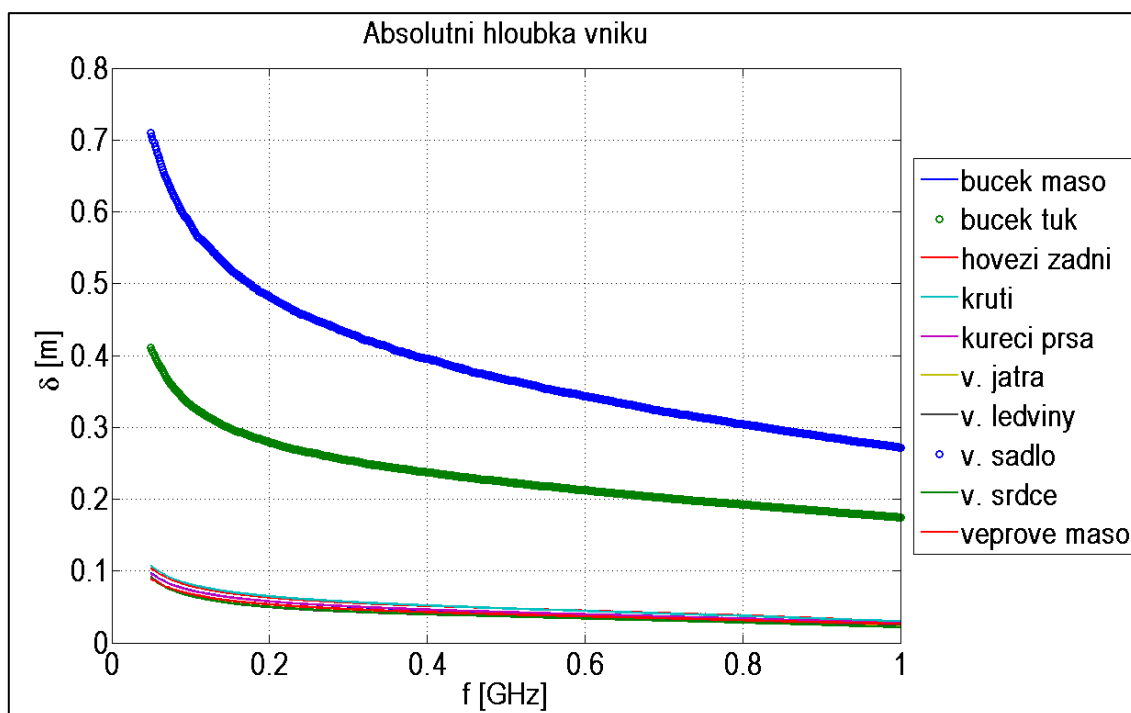


Obrázek 7.18. Graf útlumu vlny v masu bučky tloušťky 10 mm

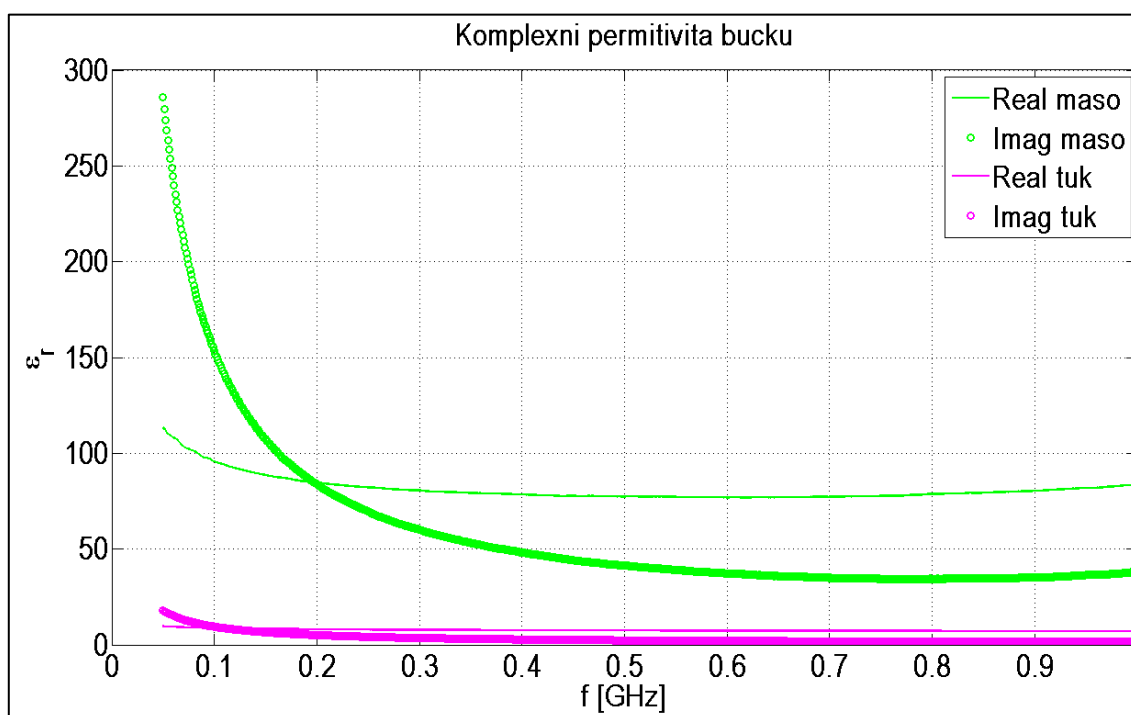


Obrázek 7.19. Graf útlumu vlny v tuku bučky tloušťky 10 mm

Na grafech (Obrázek 7.19 a 7.20) je zobrazen rozdíl mezi tukovou a svalovou tkání bučky z hlediska útlumu. Na každém z grafů je křivka intenzity elektrického pole pro jednotlivé frekvence na začátku materiálu a na jeho konci, takže rozdíl mezi těmito křivkami pro jednotlivé frekvence udává ztrátu v materiálu.



Obrázek 7.20. Graf hloubky vniku vlny



Obrázek 7.21. Graf komplexní permitivity bůčku

V grafu (Obrázek 7.21) jsou shrnuté hloubky vniku vln pro jednotlivé vzorky a měřené frekvence. V tukových tkáních vlnění prostoupí do více jak čtyř násobku průniku do jiných tkání. Na následujícím grafu (Obrázek 7.22) jsou zobrazeny obě složky komplexní permitivity masa a tuku z bůčku.

7.3 Měření elektromagnetického pole

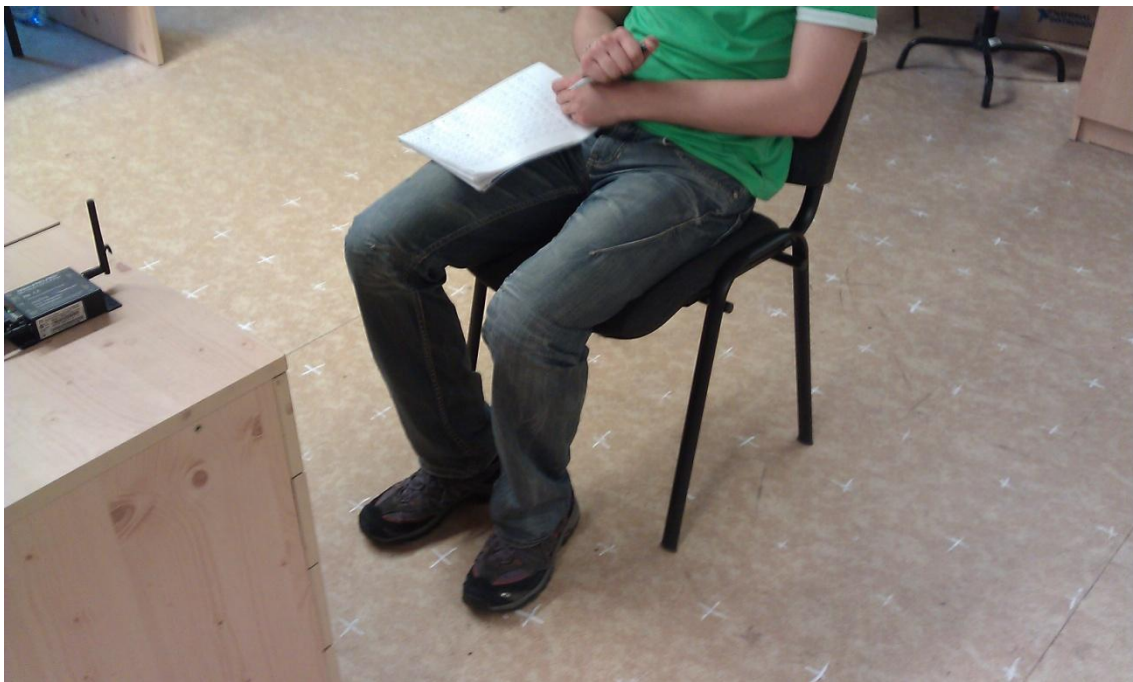
V třetím pokusu jsme měřili elektromagnetické pole vyzařované mikrovlnným zdrojem, v našem případě nejprve běžnou mikrovlnnou troubou a následně průmyslovým Wi-Fi vysílačem od firmy MaxStream, a pak také tato elektromagnetická pole ovlivněná biologickým objektem.

7.3.1 Příprava

Jak mikrovlnná trouba tak Wifi vysílač byly umístěny na skříňku a před ní na podlahu jsme vytvořili mřížku bodů o rozměru 13 x 12 bodů s hustotou mřížky 20 x 20 cm (Obrázek 7.23). Nula byla určena sklem mikrovlnné trouby, případně anténou vysílače a ve vzdálenosti dvaceti centimetrů od ní začínala první řada bodů. Nejvzdálenější řada bodů byla 240 cm od zdroje. Kvůli bezpečnosti byla do ohřívacího prostoru mikrovlnné trouby umístěna plastová nádoba naplněná vodou. Vodu bylo nutno v průběhu měření měnit, čímž mohlo dojít ke zkreslení některých naměřených hodnot.



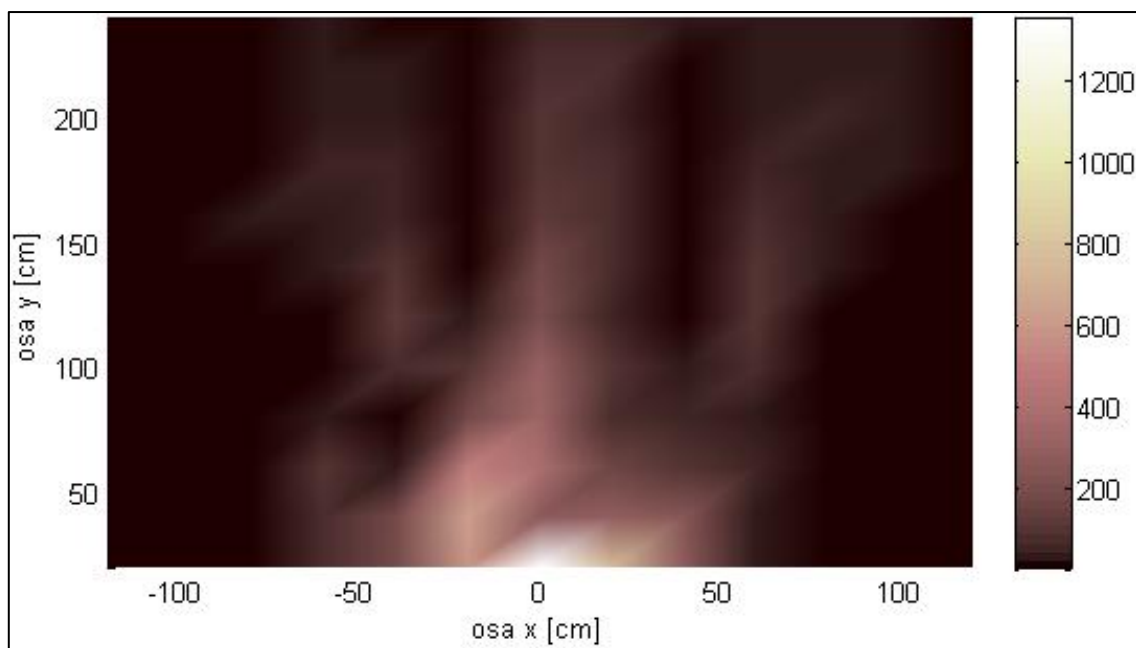
Obrázek 7.22. Měřicí pole



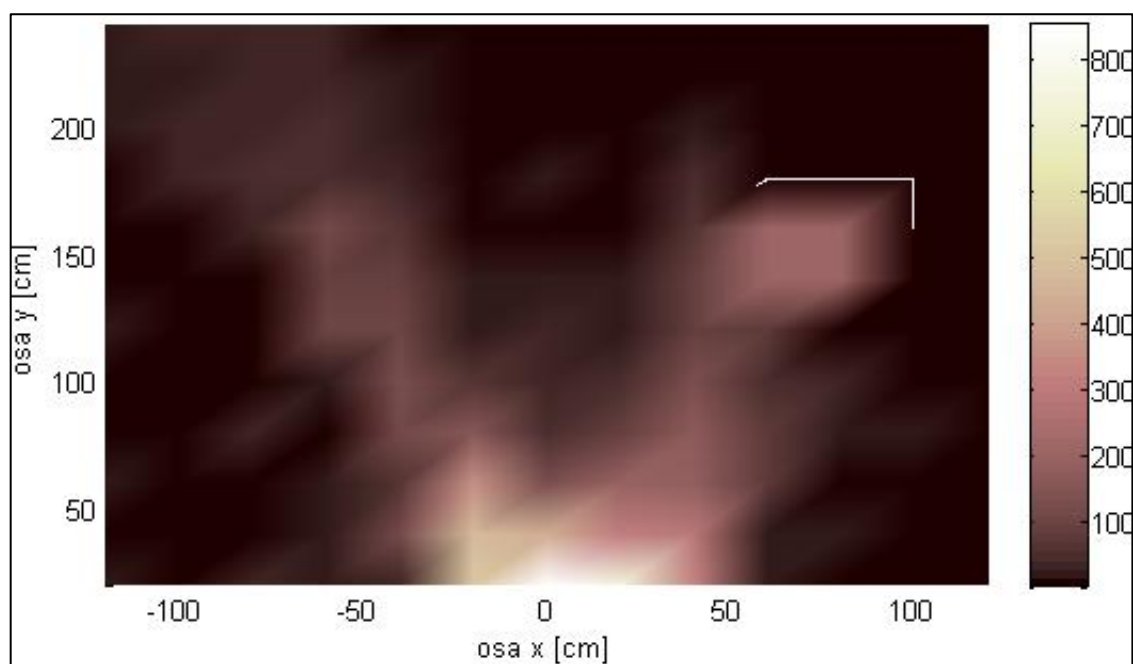
Obrázek 7.23. Figurant v poli a zdroj

Měření jsme prováděli digitálním analyzátozem elektrosmogu Gygahertz solution HFW 35 C. Při měření mikrovlnné trouby byl analyzátor v režimu RMS a Full, při měření pole Wifi byl nastaven na RMS a Pulse (interval vysílání wifi byl nastaven na nejnižší možnou hodnotu 1 ms). Efektivní hodnota byla zvolena z důvodu kolísání a velikosti signálu. Výška byla nastavena dřevěnou tyčí, která svou výškou odpovídala přibližnému středu předního skla mikrovlnné trouby/středu antény vysílače. Figurant (Obrázek 7.24), sehrávající roli biologického objektu, při obou měřeních seděl na židli, takže v rovině měření bylo záření pohlcováno jeho trupem a zabíral v této rovině v prvním měření čtyři body a ve druhém šest bodů mřížky.

7.3.2 Grafické znázornění výsledků

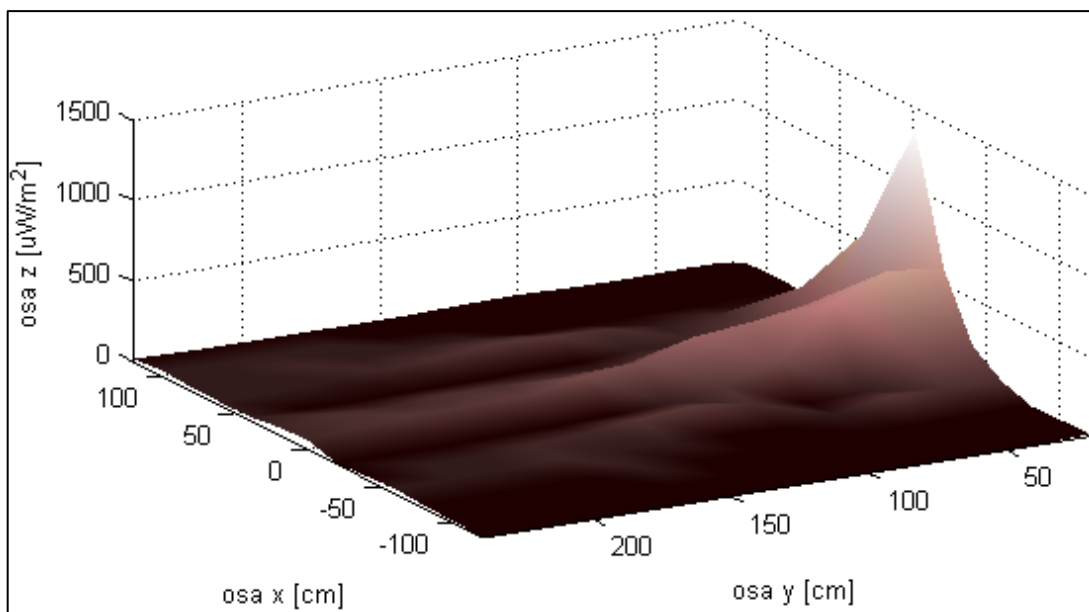


Obrázek 7.24. Graf hustoty dopadajícího výkonu mikrovlnky

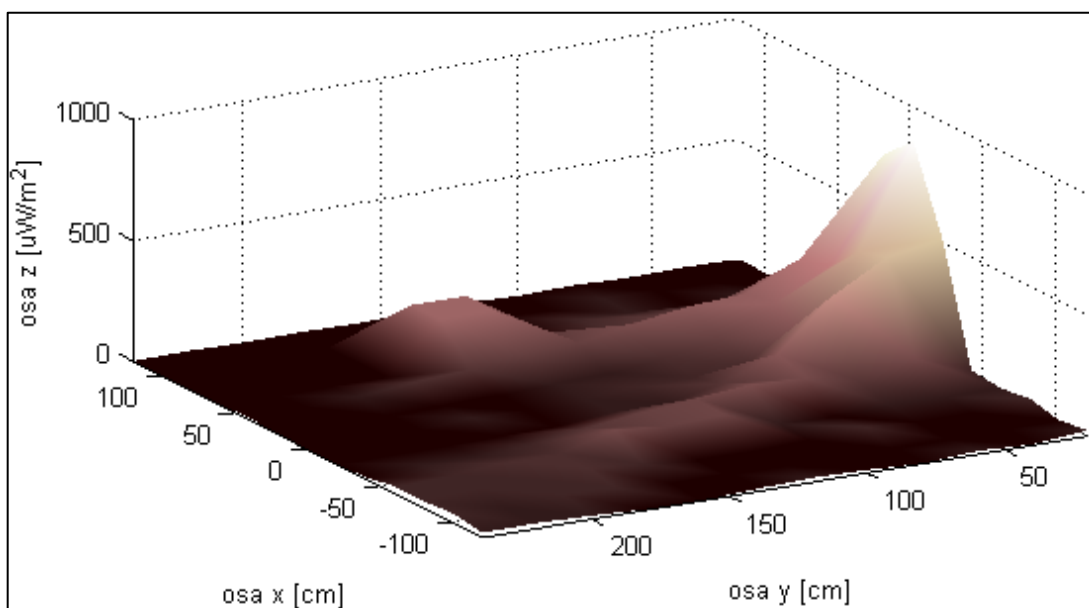


Obrázek 7.25. Graf hustoty dopadajícího výkonu mikrovlnky ovlivněné figurantem

Na všech grafech znázorňujících působení biologického objektu na elektromagnetické pole je figurant vyobrazen jako obdélník. U grafů pole mikrovlnné trouby je tento obdélník vykreslen intenzitou $200 \mu\text{W}/\text{m}^2$ (Obrázek 7.26, 7.28) a na grafech pole wifi $300 \mu\text{W}/\text{m}^2$ (Obrázek 7.30, 7.32). Díky chybě Matlabu je také jeho vzdálenější okraj na 2D zobrazení tvořen bílou čarou.

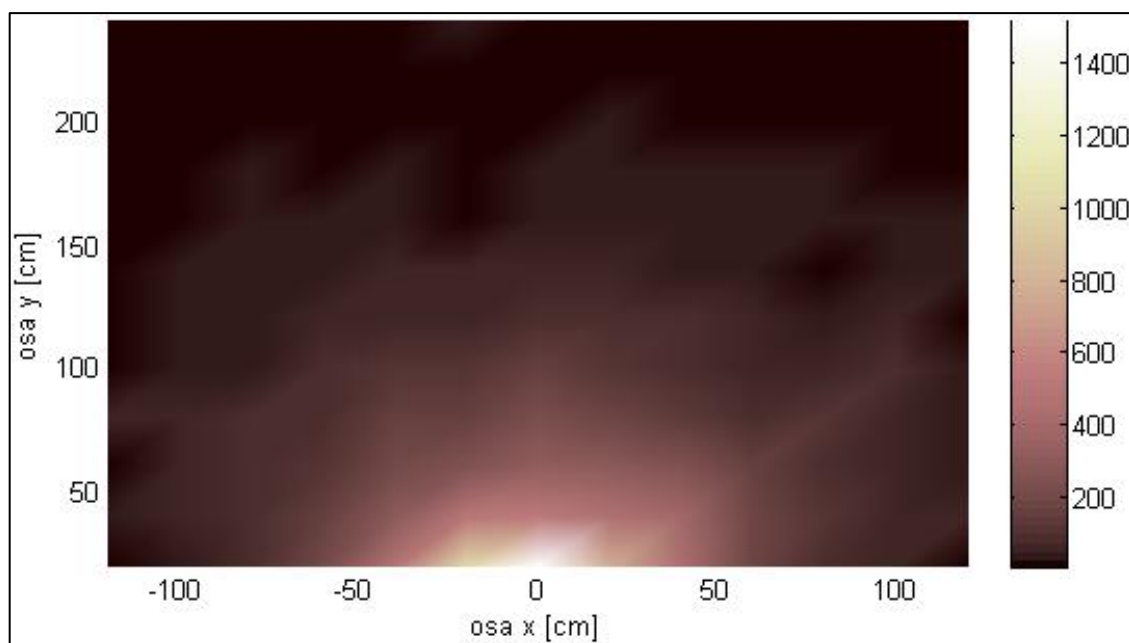


Obrázek 7.26. 3D graf hustoty dopadajícího výkonu mikrovlnné trouby

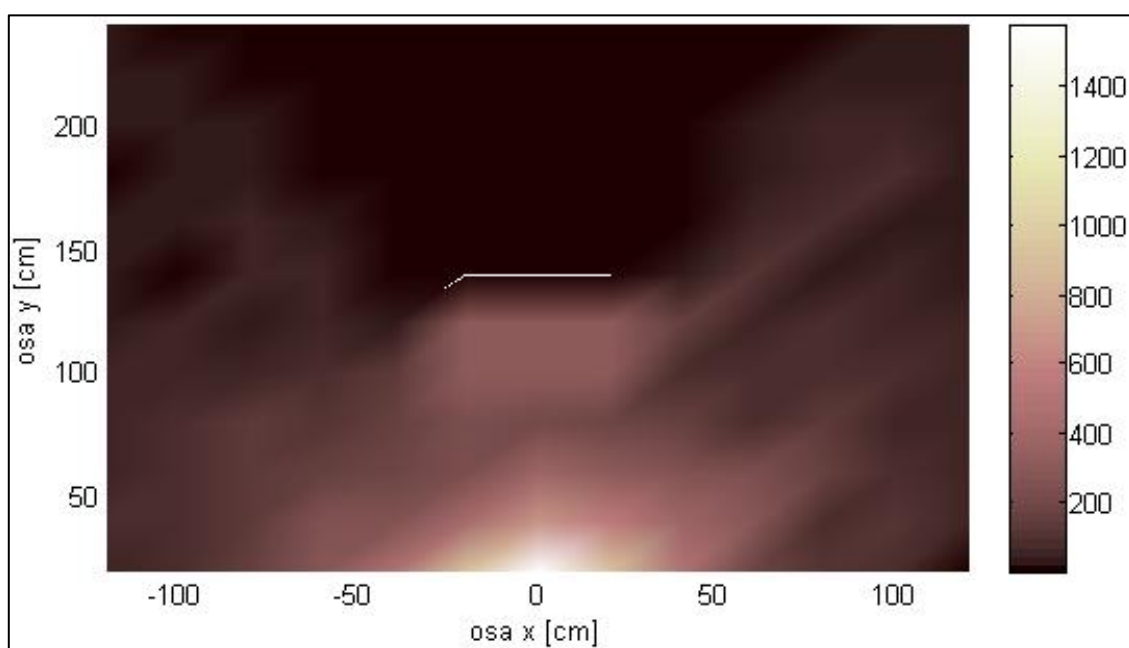


Obrázek 7.27. 3D graf hustoty dopadajícího výkonu mikrovlnné trouby ovlivněné figurantem

Vzhledem k nerovnoměrnosti vysílaného pole mikrovlnné trouby (Obrázek 7.25, 7.27) způsobeného nestejným stíněním ohřívacího prostoru a také poměrnou vzdáleností figuranta od zdroje záření, není z grafů (Obrázek 7.26, 7.28) příliš zřejmý útlum, způsobený biologickým objektem.

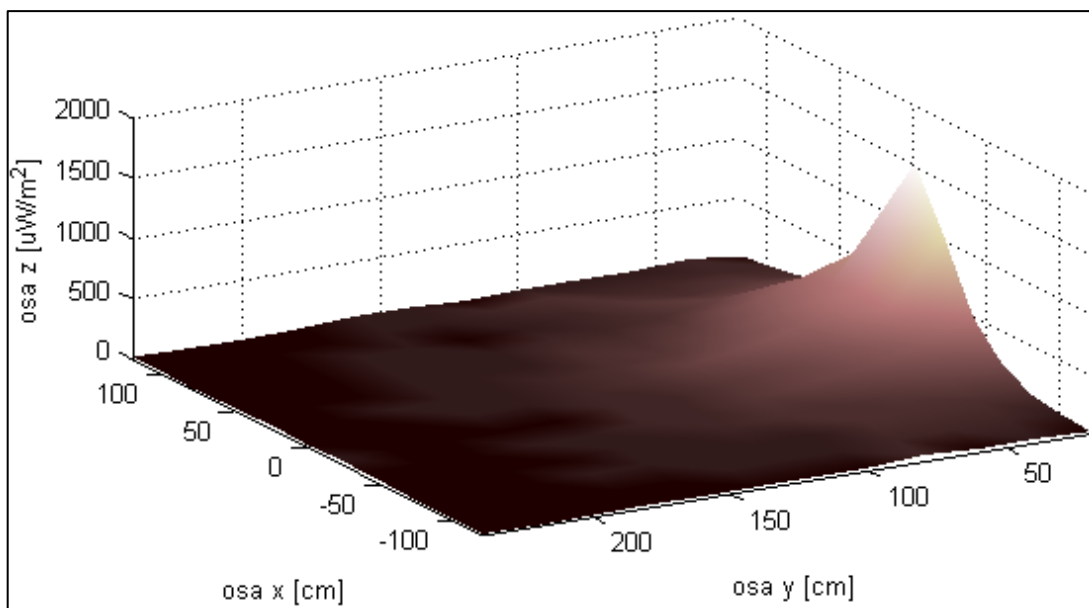


Obrázek 7.28 Graf hustoty dopadajícího výkonu wifi vysílače

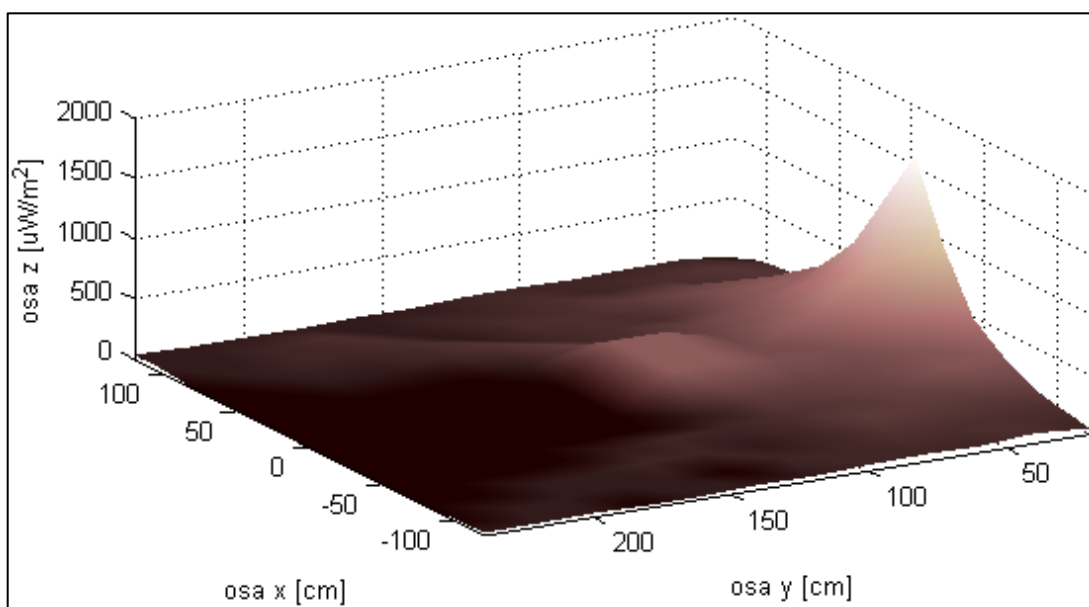


Obrázek 7.29 Graf hustoty dopadajícího výkonu wifi vysílače ovlivněné figurantem

Na rozdíl od mikrovlnné trouby, wifi vysílač se v měřené rovině chová jako bodový vysílač, takže jeho vysílané pole je rovnoměrné (Obrázek 7.29, 7.31).



Obrázek 7.30 3D Graf hustoty dopadajícího výkonu wifi vysílače



Obrázek 7.31 3D Graf hustoty dopadajícího výkonu wifi vysílače ovlivněné figurantem

Na grafech interakce wifi s biologickým objektem (Obrázek 7.30, 7.32) je již útlum zcela zřetelný.

8 Závěr

Z výsledků měření vlnovodem je patrné, že průběh vykazuje jisté špičkové hodnoty, které jsou nejspíše způsobeny stojatým vlněním, které vzniká uvnitř vlnovodu. Tyto průběhy jsou zřejmě způsobeny nevhodným umístěním měřicí antény. Vhodnější by bylo volit jiný způsob měření jako například rezonanční dutinu s pohyblivými anténami. Toto je ovšem v našich podmínkách nereálné. Tato metoda se neosvědčila pro naše účely a vyžaduje do budoucna vylepšení, což je nad rámec této práce a je to tudíž možný návrh pro předmět zkoumání do diplomové práce.

Z výsledků měření na materiálovém analyzátoru lze vyčíst výrazný rozdíl tlumení elektromagnetického vlnění tkání tukovou a netukovou, to lze vysvětlit menším obsahem vody v tukové tkáni (nejméně vody je v sádle) oproti ostatním.

Jak je vidět z výsledků měření rozložení elektromagnetického pole, útlum biologického objektu je velmi znatelný. Vzhledem k nerovnoměrnému stínění mikrovlnné trouby a příliš vzdálenému biologickému objektu to není z grafů znázorňujících toto měření příliš vidět. To ale vynahrazují grafy pole wifi, kde díky rovnoměrnému rozložení pole bodového vysílače a blízkosti biologického objektu je útlum jasně viditelný.

Pokud bychom porovnávali maximální naměřené hodnoty elektromagnetického pole vyzařovaného mikrovlnnou troubou a wifi s maximálními povolenými hodnotami elektromagnetického záření ve staré (přísnější) vyhlášce hlavního hygienika ČR z roku 1990, vzhledem k nejvyšší naměřené hodnotě $1572 \mu\text{W}/\text{m}^2$ a maximální povolené hodnotě jak pro obyvatelstvo ($0,25\text{mW}/\text{cm}^2 = 2,5\text{W}/\text{m}^2$), tak pro lidi pracující na vysokofrekvenčních výkonových zařízeních ($2,65\text{mW}/\text{cm}^2 = 26,5\text{W}/\text{m}^2$), naměřené hodnoty tyto hranice nikdy nepřekonal. K témuž závěru dojdeme, pokud bychom vzali v úvahu, že jsme měřili efektivní hodnotu, a předpokládali maximální hodnotu dvoj až trojnásobnou.

Seznam zdrojů použitých obrázků

- Obrázek 2.1 – <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Electromagnetic-Spectrum.png>
- Obrázek 2.2 – <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a0/Magnetron1.jpg>
- Obrázek 2.3 – <http://fyzweb.cuni.cz/dilna/krouzky/mikrov/o2.gif>
- Obrázek 2.4 – <http://mainland.cctt.org/istf2008/images/magnetron.jpg>
- Obrázek 2.5 – <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/91/Reflex.sch.enp.svg>
- Obrázek 2.6 – <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/a/aa/Klystron.enp.gif>
- Obrázek 3.1 – <http://www.gallawa.com/microtech/images/firstmicro.gif>
- Obrázek 3.2 – [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/64/Působení_mikrovlny_na_molekulu_vody.JPG](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/64/P%C5%99isobn%C4%99n%C3%AD_mikrovlnny_na_molekulu_vody.JPG)
- Obrázek 3.3 – http://www.acr.army.cz/images/id_8001_9000/8753/radar/obr/trouba.gif
- Obrázek 4.1 – http://www.asc-csa.gc.ca/images/radarsat2_figure4_1_h.jpg
- Obrázek 4.2 – http://access.feld.cvut.cz/storage/201003260955_fig01.jpg
- Obrázek 4.3 – http://3.bp.blogspot.com/_tf2wIDFuUSM/Swfzab7wxLI/AAAAAAAAAJc/u4eo2REgYDc/s1600/difraction.bmp
- Obrázek 5.1 – http://lucy.troja.mff.cuni.cz/~tichy/vfel/03_2.html
- Obrázek 5.2 – <http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/vf-elektronika/images/323a.gif>
<http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/vf-elektronika/images/323b.gif>

Seznam použité literatury

- [1] HAŇKA, Ladislav. Teorie elektromagnetického pole. 1. vyd. Praha : SNTL ; Bratislava : Alfa, 1975. 578 s.
- [2] TRUHLÁŘ, Martin. Mikrovlnný ohřev plošných útvarů pomocí stojaté vlny ve vlnovodu. Diplomová práce. TUL Liberec, 2007.
- [3] VRBA, Jan. Modeling of fields : Production of doctoral grant GAČR 102/03/H086. Prague, 2006. ISBN 80-86582-19-1.
- [4] Non-standard Application of Physical Fields : Production of doctoral grant GAČR 102/08/H081, editor: prof. Ing. Richter, CSc. Liberec, 2011. ISBN 978-80-7372-714-7.
- [5] VRBA, Jan. Úvod do mikrovlnné techniky. Vyd. 2., přeprac. Praha : Nakladatelství ČVUT, 2007. 170 s. ISBN 978-80-01-03670-9.
- [6] INAN, U.S.; INAN, A.S. Engineering electromagnetics. Prentice Hall. 1999. ISBN 978-0805344233
- [7] MAZÁNEK, Miloš - PECHAČ, Pavel - VRBA, Jan. Základy antén, šíření vln a mikrovlnné techniky. Vyd. 1. V Praze : České vysoké učení technické, 2008. 103 s. ISBN 978-80-01-03997-7 (brož.).
- [8] VRBA, Jan. Lékařské aplikace mikrovlnné techniky. Vyd. 1. V Praze : Nakladatelství ČVUT, 2007 dotisk. 168 s. ISBN 978-80-01-02705-9 (dotisk : brož.).
- [9] Multimediální učebnice, Elektromagnetické vlny a Mikrovlnná technika [online]. FEEC VUT Brno [cit. 2011-04-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php>>
- [10] Jak funguje mikrovlnná trouba, FyzWeb články [online]. Kroužky fyziky na MFF UK [cit. 2011-04-05]. Dostupný z WWW: <<http://fyzweb.cuni.cz/dilna/krouzky/mikrov/mikrov.htm>>
- [11] Microwave oven. In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 18.6.2002, last modified on 21.4.2011 [cit.

2011-04-22]. Dostupné z WWW:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Microwave_oven>.

- [12] Nařízení vlády č. 480/2000 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením
- [13] RICHTER, Aleš. Učební text k předmětu Teoretická elektrotechnika. TUL 2010
- [14] RICHTER, Aleš. Učební text k předmětu Ochrana před nebezpečnými účinky elektromagnetického pole. TUL 2011
- [15] Agilent E4991 A RF Impedance/Material Analyzer, Operační manuál

Při zpracování jednotlivých kapitol jsem vycházel z následujících zdrojů:

kapitola 1

[11]

kapitola 2

[1], [5], [7], [8], [3], [4]

kapitola 3

[10], [11]

kapitola 4

[1], [9], [13], [6]

kapitola 5

[2], [5]

kapitola 6

[5], [8], [12], [14]

kapitola 7

[15]

Seznam příloh

- [1] Příloha A – Data a grafy z měření ve vlnovodu
- [2] Příloha B – Grafy z měření analyzátozem
- [3] Příloha C – Data a grafy z měření pole

Příloha A

Data a grafy z měření ve vlnovodu

Ve vlnovodu - maso							amp = 100 mV
f [GHz]	1,9	1,95	2	2,05	2,1	2,15	2,2
p1 [uW/m2]	3,93	1,83	74	4,36	36,7	410	21,8
p2,5 [uW/m2]	0,5	0,32	7,17	0,85	5,29	50	4,93
p0 [mW/m2]	0,77	5,45	2,41	2,32	4,01	8,66	2,4
p0 [mW/m2]	770	5450	2410	2320	4010	8660	2400
poměr p1 [1]	0,005104	0,000336	0,030705	0,001879	0,009152	0,047344	0,009083
poměr p2,5 [1]	0,000649	5,87E-05	0,002975	0,000366	0,001319	0,005774	0,002054

f [GHz]	2,25	2,3	2,31	2,32	2,33	2,34	2,35
p1 [uW/m2]	17,2	21,7	30,1	51,1	101,2	99,8	45,4
p2,5 [uW/m2]	2,78	2,52	3,03	4,24	7,36	15,47	17,24
p0 [mW/m2]	9,83	4,24	3,48	2,96	2,68	2,75	3,28
p0 [mW/m2]	9830	4240	3480	2960	2680	2750	3280
poměr p1 [1]	0,00175	0,005118	0,008649	0,017264	0,037761	0,036291	0,013841
poměr p2,5 [1]	0,000283	0,000594	0,000871	0,001432	0,002746	0,005625	0,005256

f [GHz]	2,36	2,37	2,38	2,39	2,4	2,41	2,42
p1 [uW/m2]	24,8	17,5	15	14,9	15,6	14,2	10,3
p2,5 [uW/m2]	9	5,25	3,87	3,46	3,4	3	2,1
p0 [mW/m2]	4,43	6,45	9,66	13,71	16,51	16,64	14,04
p0 [mW/m2]	4430	6450	9660	13710	16510	16640	14040
poměr p1 [1]	0,005598	0,002713	0,001553	0,001087	0,000945	0,000853	0,000734
poměr p2,5 [1]	0,002032	0,000814	0,000401	0,000252	0,000206	0,00018	0,00015

f [GHz]	2,43	2,44	2,45	2,46	2,47	2,48	2,49
p1 [uW/m2]	7,03	5,19	4,72	5,06	5,47	5,5	5,94
p2,5 [uW/m2]	1,34	0,95	0,82	0,83	0,84	0,8	0,77
p0 [mW/m2]	9,61	6,15	4,54	4,03	3,67	2,9	2,33
p0 [mW/m2]	9610	6150	4540	4030	3670	2900	2330
poměr p1 [1]	0,000732	0,000844	0,00104	0,001256	0,00149	0,001897	0,002549
poměr p2,5 [1]	0,000139	0,000154	0,000181	0,000206	0,000229	0,000276	0,00033

f [GHz]	2,5	2,55	2,6	2,65	2,7	2,75	2,8
p1 [uW/m2]	8,03	76,5	27,5	17,1	48,8	73,6	112,9
p2,5 [uW/m2]	0,92	7,46	7,02	2,4	4,53	3,77	8,5
p0 [mW/m2]	2,38	10,41	8,2	5,01	12,34	11,67	4,14
p0 [mW/m2]	2380	10410	8200	5010	12340	11670	4140
poměr p1 [1]	0,003374	0,007349	0,003354	0,003413	0,003955	0,006307	0,027271
poměr p2,5 [1]	0,000387	0,000717	0,000856	0,000479	0,000367	0,000323	0,002053

f [GHz]	2,85	2,9	2,95	3
p1 [uW/m2]	28,4	8,66	14,16	32,7
p2,5 [uW/m2]	3,56	0,64	0,62	0,84
p0 [mW/m2]	4,53	10,04	7,34	7,03
p0 [mW/m2]	4530	10040	7340	7030
poměr p1 [1]	0,006269	0,000863	0,001929	0,004651
poměr p2,5 [1]	0,000786	6,37E-05	8,45E-05	0,000119

Ve vlnovodu - fantom						amp = 100 mV	
f [GHz]	1,9	1,95	2	2,05	2,1	2,15	2,2
p1 [uW/m2]	27,7	4,5	121,9	12,3	350	570	51,8
p0 [uW/m2]	810	5360	3040	1840	5860	4960	2670
p2 [uW/m2]	21,9	3,3	111,8	7,9	190	430	33,2
p0 [uW/m2]	820	5350	2970	1860	5500	5440	2610
p3 [uW/m2]	44,2	8,4	94	29,5	740	900	107,5
p0 [uW/m2]	750	4490	3210	1720	5940	4350	2680
poměr p1 [1]	0,034198	0,00084	0,040099	0,006685	0,059727	0,114919	0,019401
poměr p2 [1]	0,026707	0,000617	0,037643	0,004247	0,034545	0,079044	0,01272
poměr p3 [1]	0,058933	0,001871	0,029283	0,017151	0,124579	0,206897	0,040112

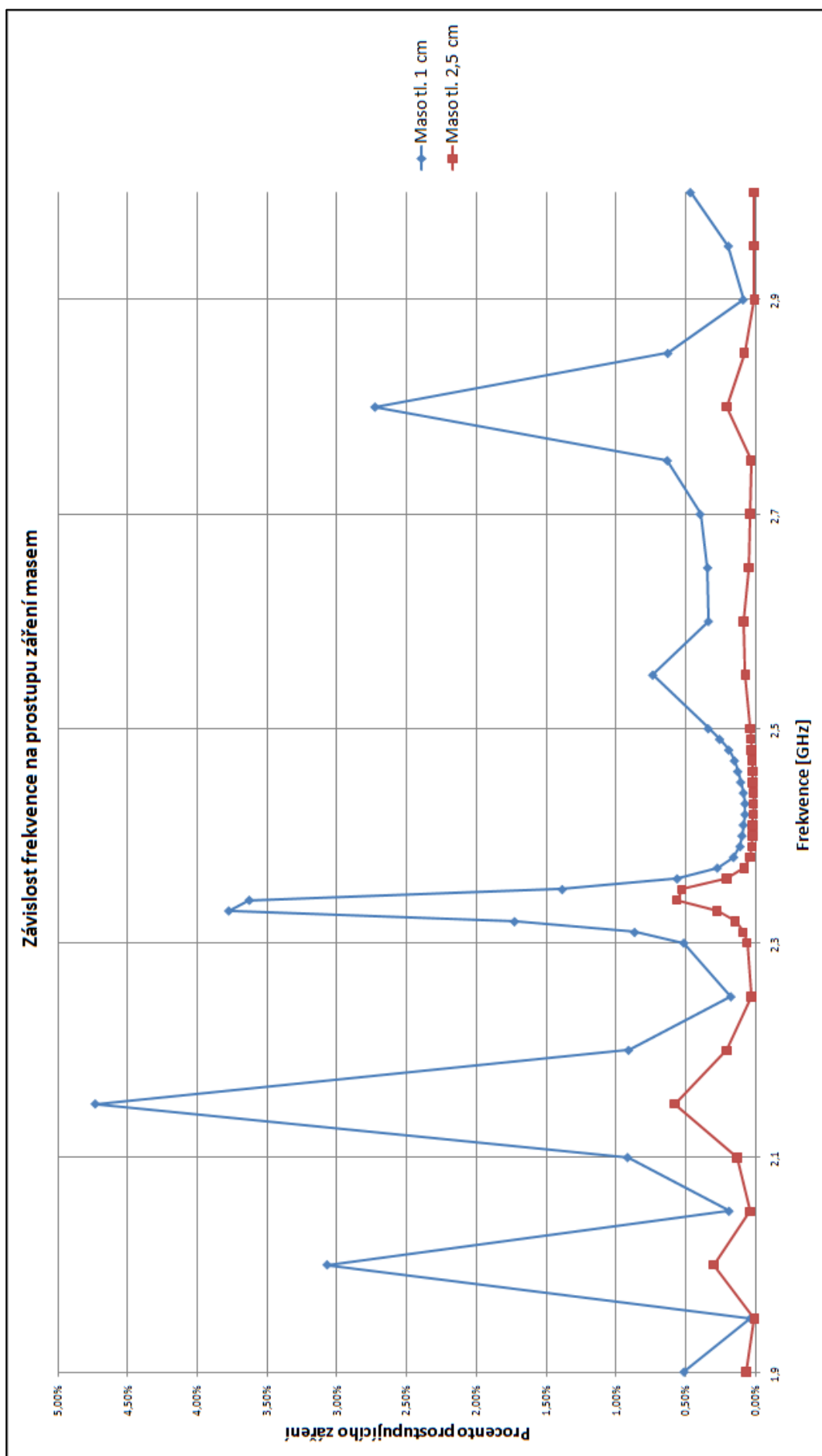
f [GHz]	2,25	2,3	2,31	2,32	2,33	2,34	2,35
p1 [uW/m2]	123,2	800	410	190	82,7	53,5	43,1
p0 [uW/m2]	10420	2550	2320	2240	2360	2880	4070
p2 [uW/m2]	63,4	550	290	107,4	45,7	26,6	19,8
p0 [uW/m2]	11250	2750	2470	2350	2440	2930	4070
p3 [uW/m2]	230	1000	720	430	270	139,6	114,1
p0 [uW/m2]	8450	2250	2080	2030	2180	2670	3770
poměr p1 [1]	0,011823	0,313725	0,176724	0,084821	0,035042	0,018576	0,01059
poměr p2 [1]	0,005636	0,2	0,117409	0,045702	0,01873	0,009078	0,004865
poměr p3 [1]	0,027219	0,444444	0,346154	0,211823	0,123853	0,052285	0,030265

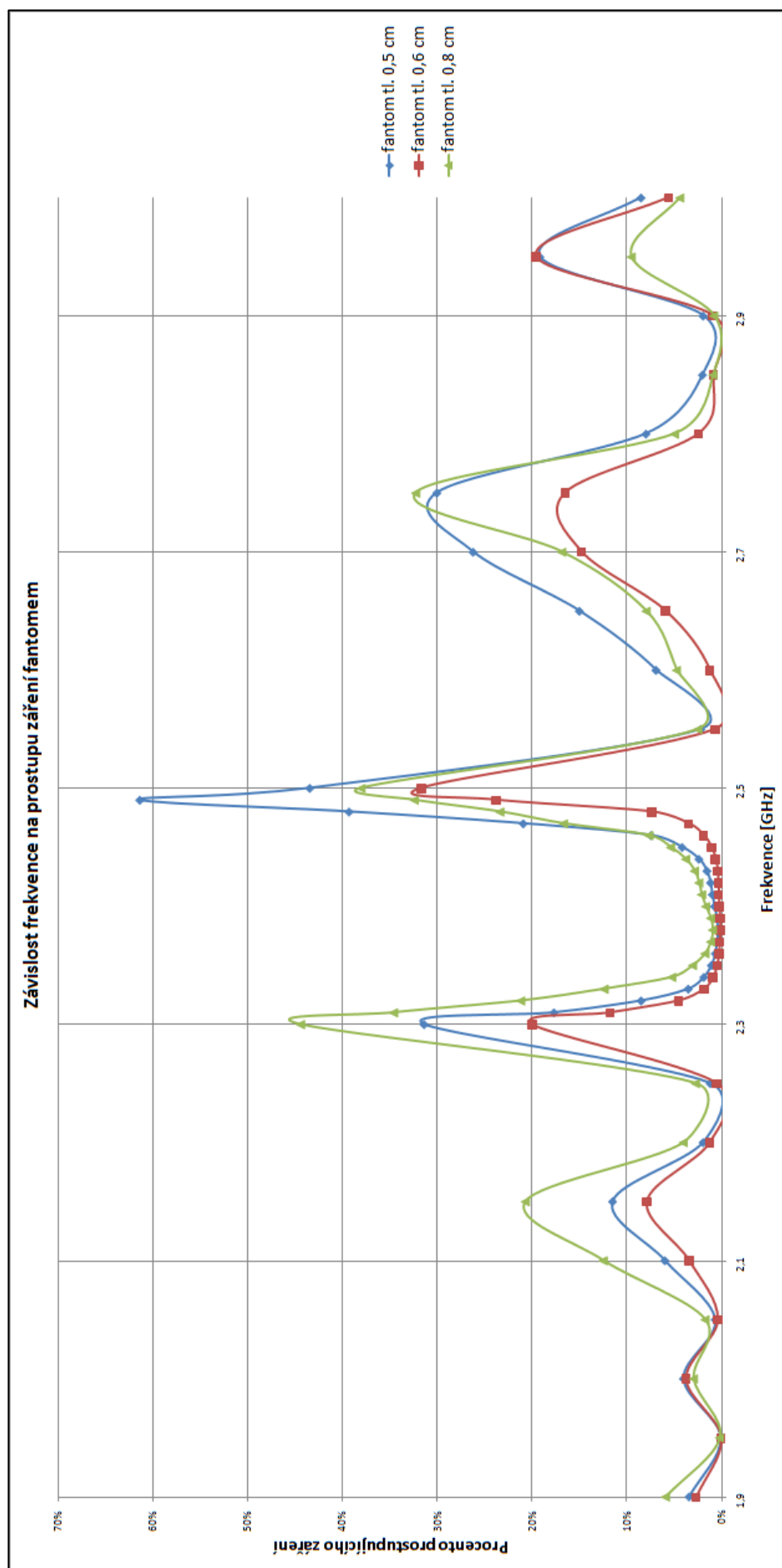
f [GHz]	2,36	2,37	2,38	2,39	2,4	2,41	2,42
p1 [uW/m2]	41,6	45,9	56,9	76,6	98,6	102,5	87,7
p0 [uW/m2]	6350	10400	15100	16020	13500	10610	7600
p2 [uW/m2]	18,1	18,9	22,3	28,9	35,9	36	29,1
p0 [uW/m2]	6250	10110	15010	16680	14570	11660	8450
p3 [uW/m2]	107,6	113	130,7	162,1	193,4	191,6	156,5
p0 [uW/m2]	6220	10040	14240	14350	11720	9160	6630
poměr p1 [1]	0,006551	0,004413	0,003768	0,004782	0,007304	0,009661	0,011539
poměr p2 [1]	0,002896	0,001869	0,001486	0,001733	0,002464	0,003087	0,003444
poměr p3 [1]	0,017299	0,011255	0,009178	0,011296	0,016502	0,020917	0,023605

Ve vlnovodu - fantom						amp = 100 mV	
f [GHz]	2,43	2,44	2,45	2,46	2,47	2,48	2,49
p1 [uW/m2]	74,8	76,2	101,2	166,6	460	770	1080
p0 [uW/m2]	4880	3210	2440	2240	2200	1960	1760
p2 [uW/m2]	23,3	22,2	27,8	44,3	76,9	141,9	400
p0 [uW/m2]	5450	3520	2620	2330	2210	1920	1680
p3 [uW/m2]	122,5	109,6	122,7	167,4	370	470	590
p0 [uW/m2]	4340	2910	2290	2190	2220	2010	1820
poměr p1 [1]	0,015328	0,023738	0,041475	0,074375	0,209091	0,392857	0,613636
poměr p2 [1]	0,004275	0,006307	0,010611	0,019013	0,034796	0,073906	0,238095
poměr p3 [1]	0,028226	0,037663	0,053581	0,076438	0,166667	0,233831	0,324176

f [GHz]	2,5	2,55	2,6	2,65	2,7	2,75	2,8
p1 [uW/m2]	860	220	400	790	3650	2240	330
p0 [uW/m2]	1980	10100	5790	5270	13930	7460	4140
p2 [uW/m2]	580	68,7	74,2	300	2070	1320	102,4
p0 [uW/m2]	1830	9860	5880	5060	14000	7990	4160
p3 [uW/m2]	780	240	260	420	2220	2240	210
p0 [uW/m2]	2050	9690	5500	5290	13170	6940	4240
poměr p1 [1]	0,434343	0,021782	0,069085	0,149905	0,262024	0,300268	0,07971
poměr p2 [1]	0,31694	0,006968	0,012619	0,059289	0,147857	0,165207	0,024615
poměr p3 [1]	0,380488	0,024768	0,047273	0,079395	0,168565	0,322767	0,049528

f [GHz]	2,85	2,9	2,95	3
p1 [uW/m2]	161,5	172,7	910	720
p0 [uW/m2]	8060	8900	4750	8480
p2 [uW/m2]	65	85,3	920	450
p0 [uW/m2]	7680	9190	4700	8020
p3 [uW/m2]	72,2	60,6	420	350
p0 [uW/m2]	8120	7720	4410	8000
poměr p1 [1]	0,020037	0,019404	0,191579	0,084906
poměr p2 [1]	0,008464	0,009282	0,195745	0,05611
poměr p3 [1]	0,008892	0,00785	0,095238	0,04375

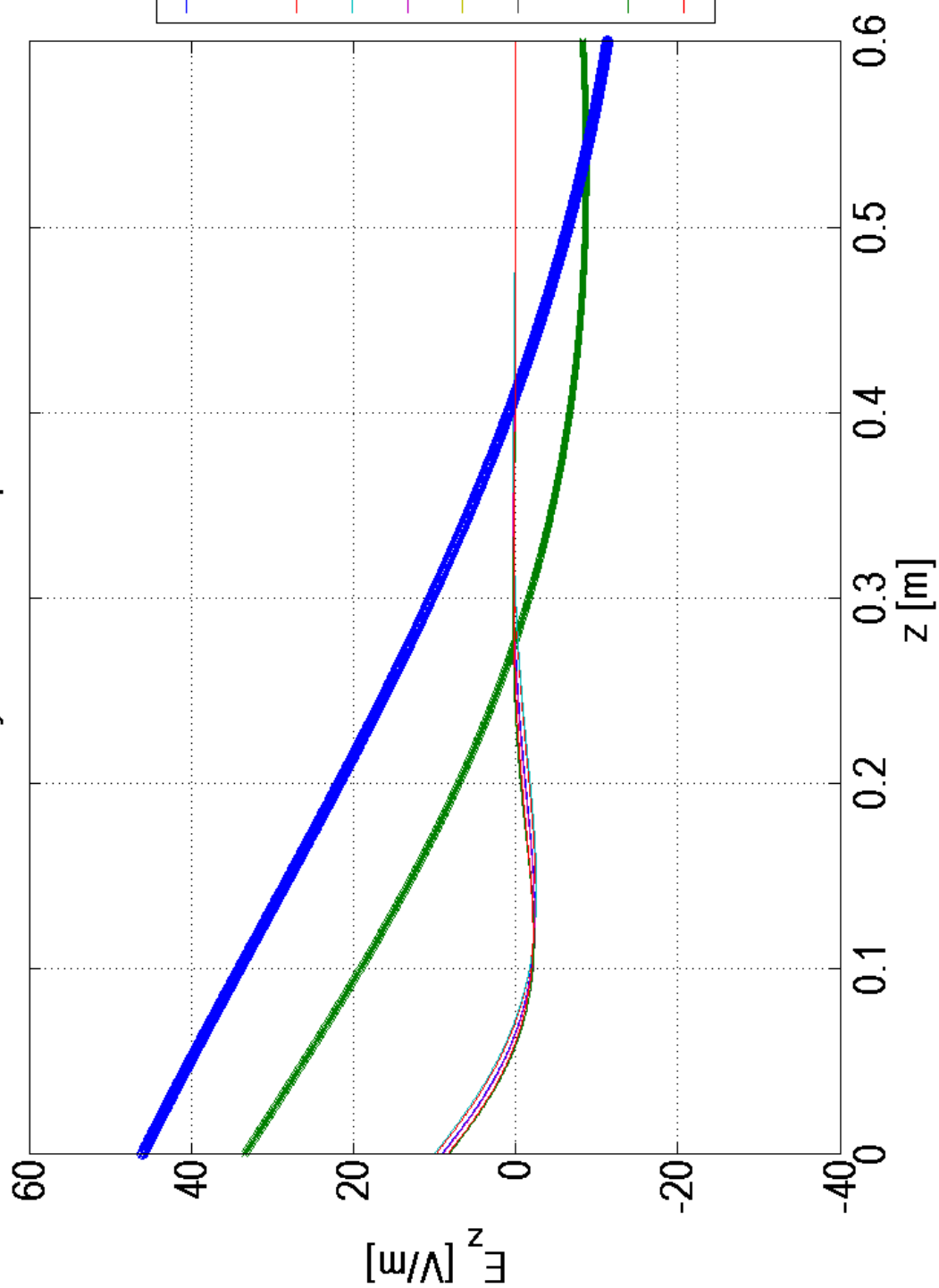




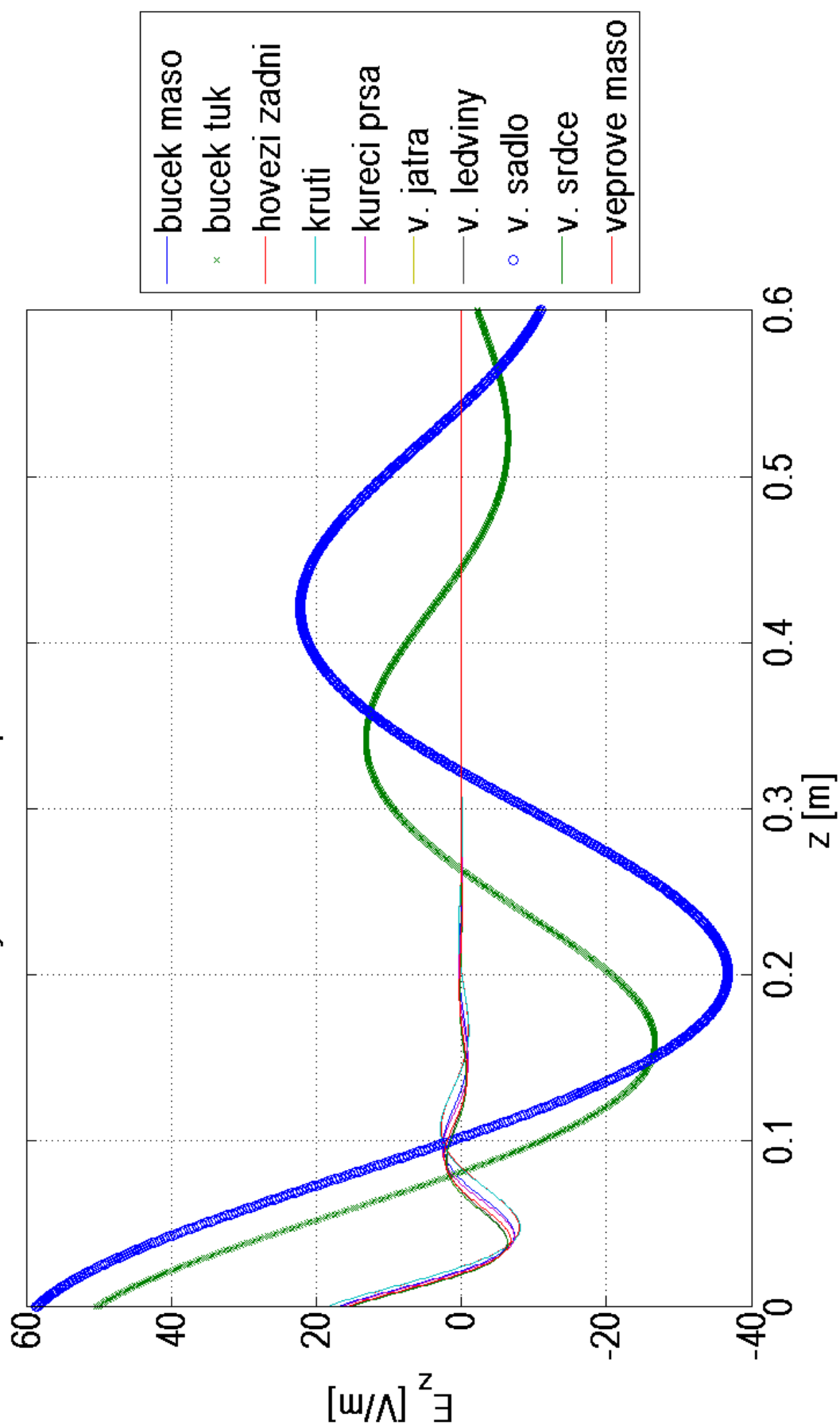
Příloha B

Grafy z měření analyzátozem

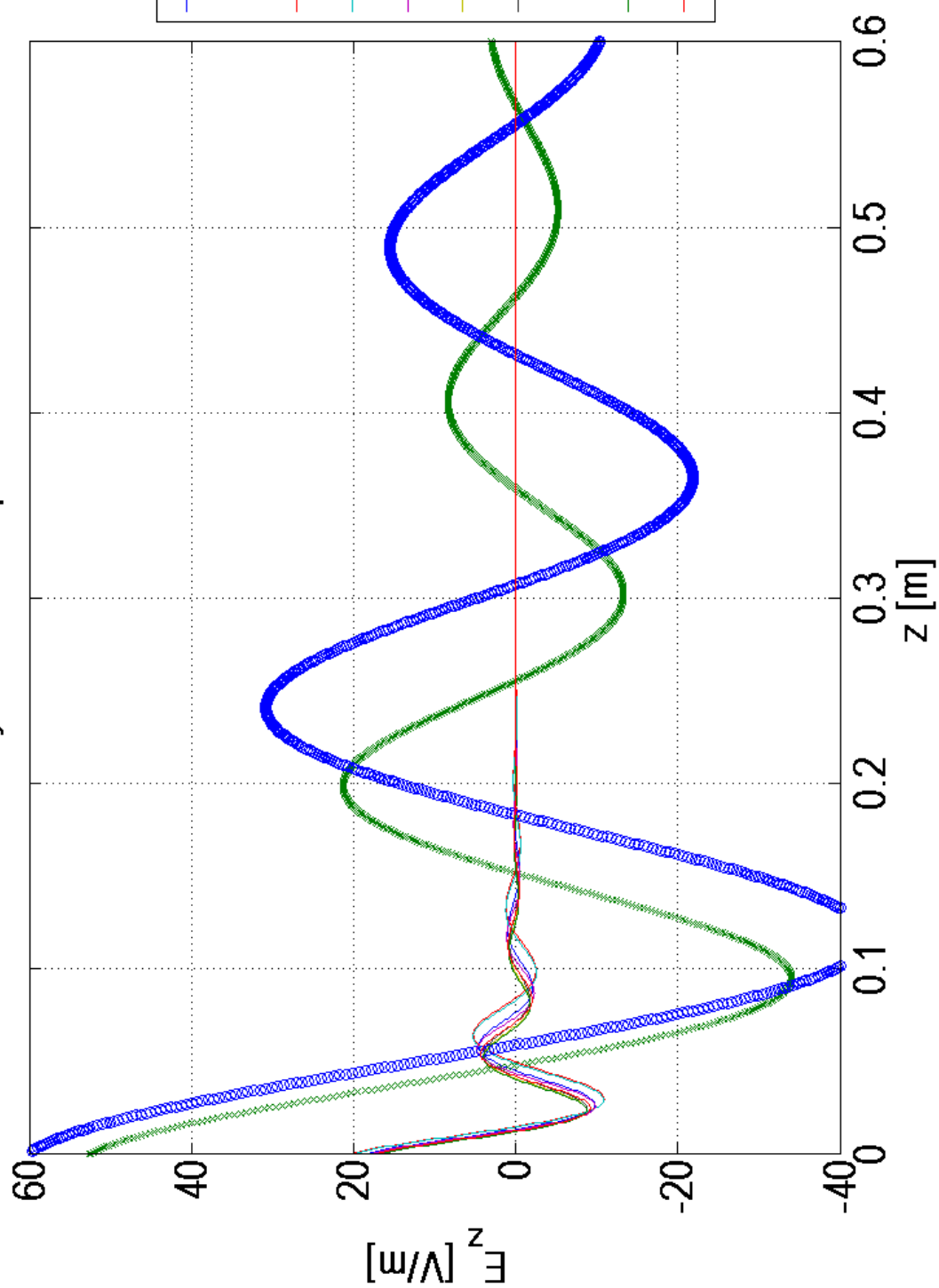
Prubeh tlumene vlny v materialu pri frekvenci 50 MHz



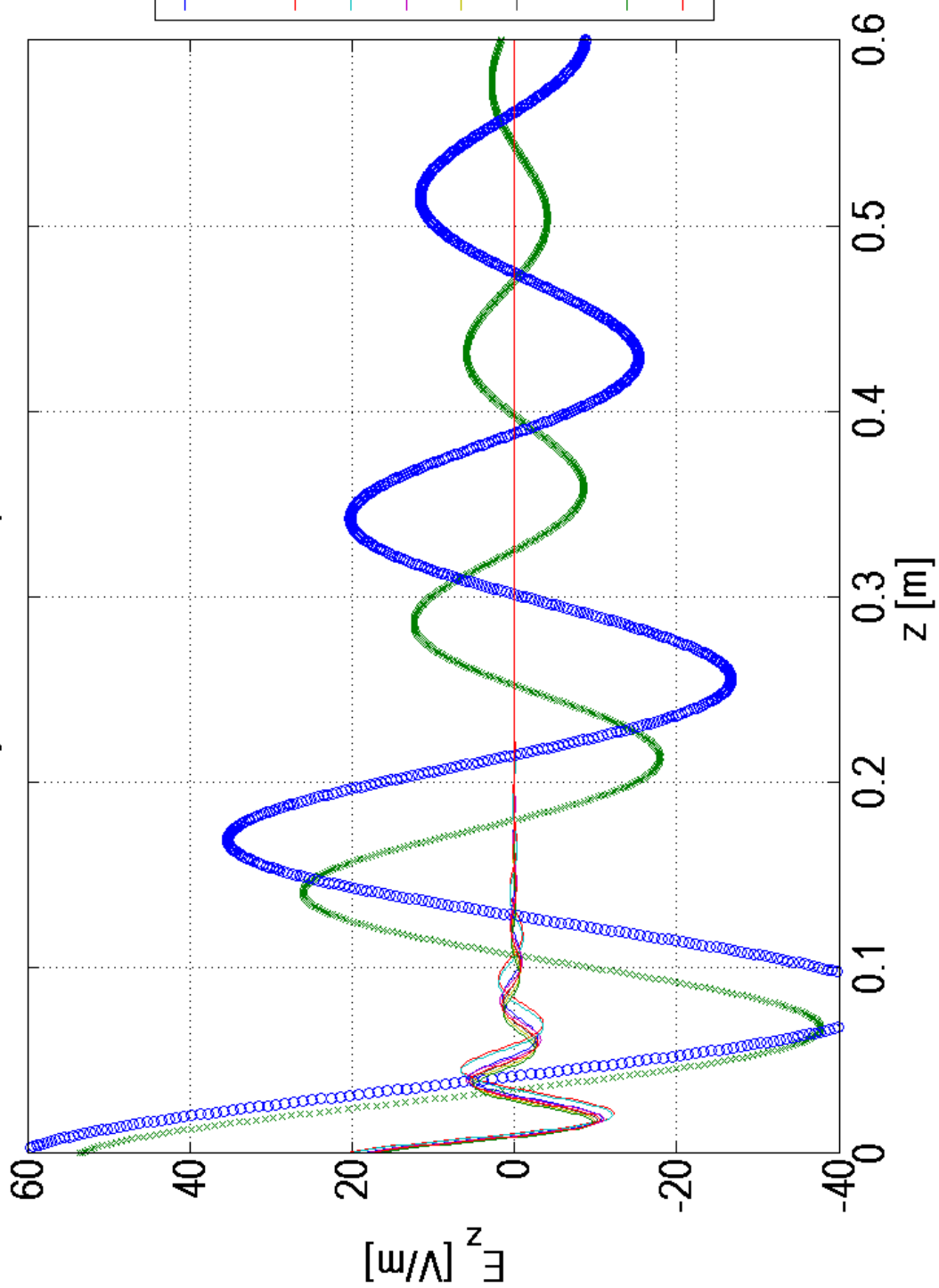
Prubeh tlumene vlny v materialu pri frekvenci 287.5 MHz



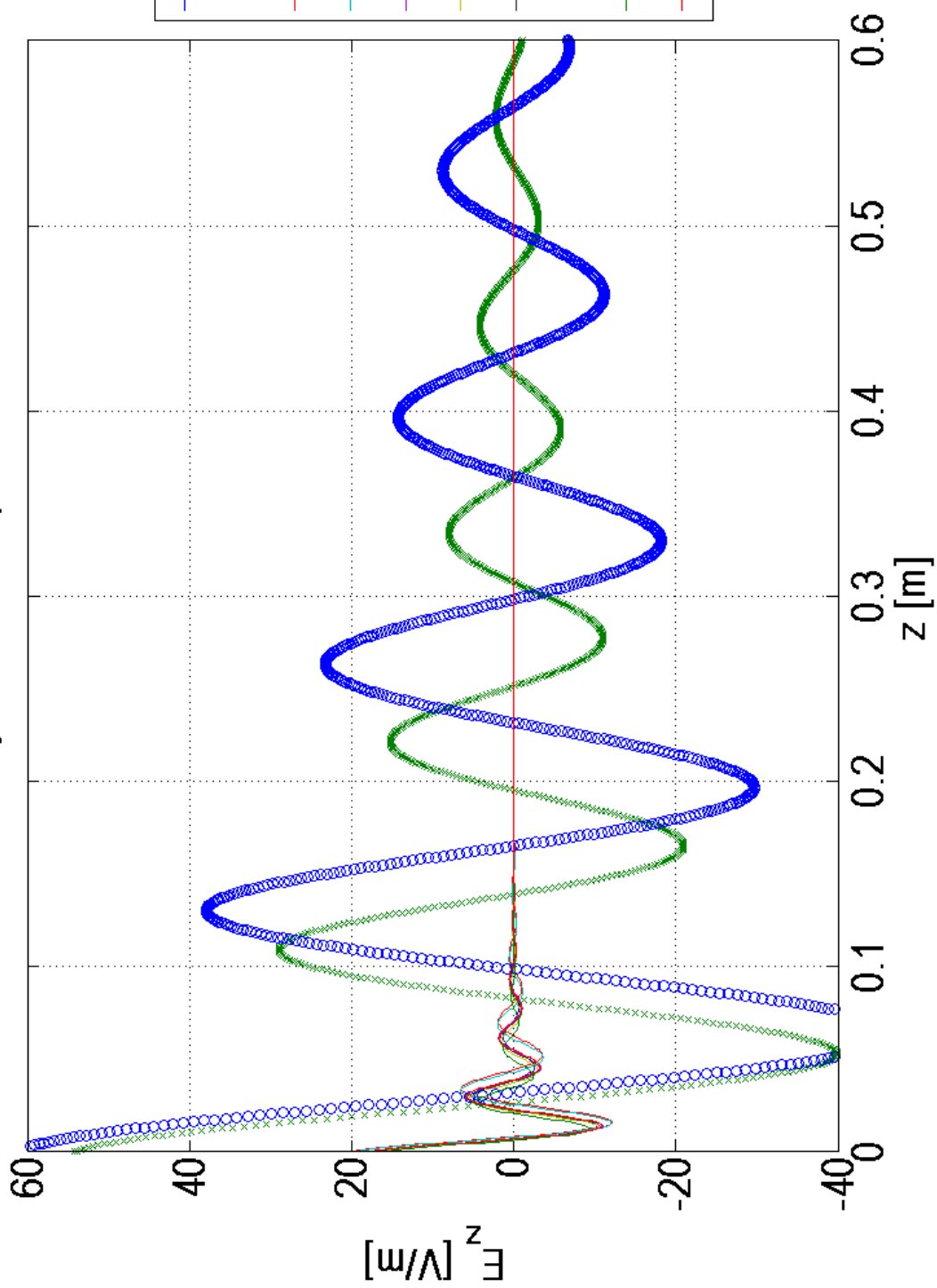
Prubeh tlumene vlny v materialu pri frekvenci 525 MHz



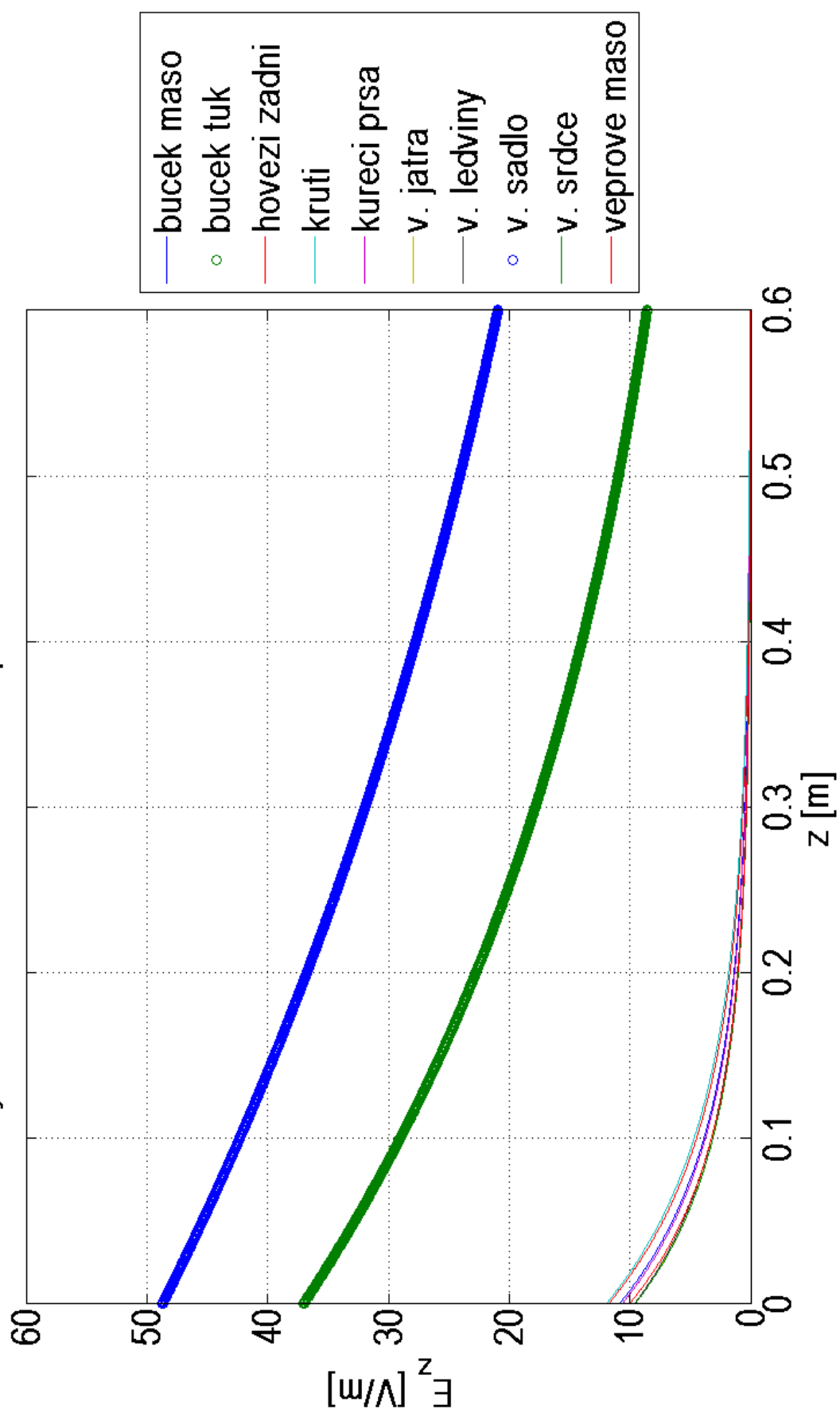
Prubeh tlumene vlny v materialu pri frekvenci 762.5 MHz



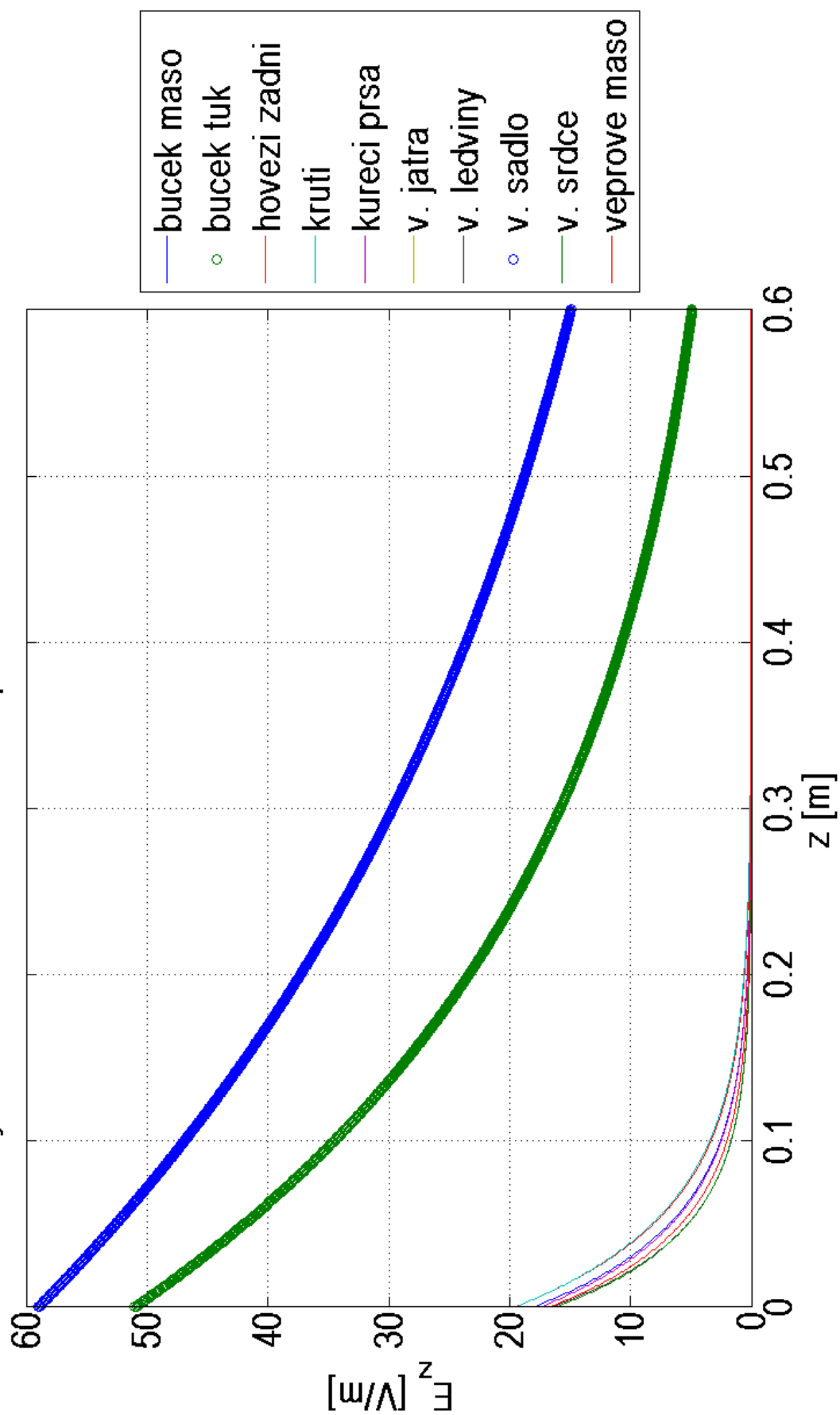
Prubeh tlumene vlny v materialu pri frekvenci 1000 MHz



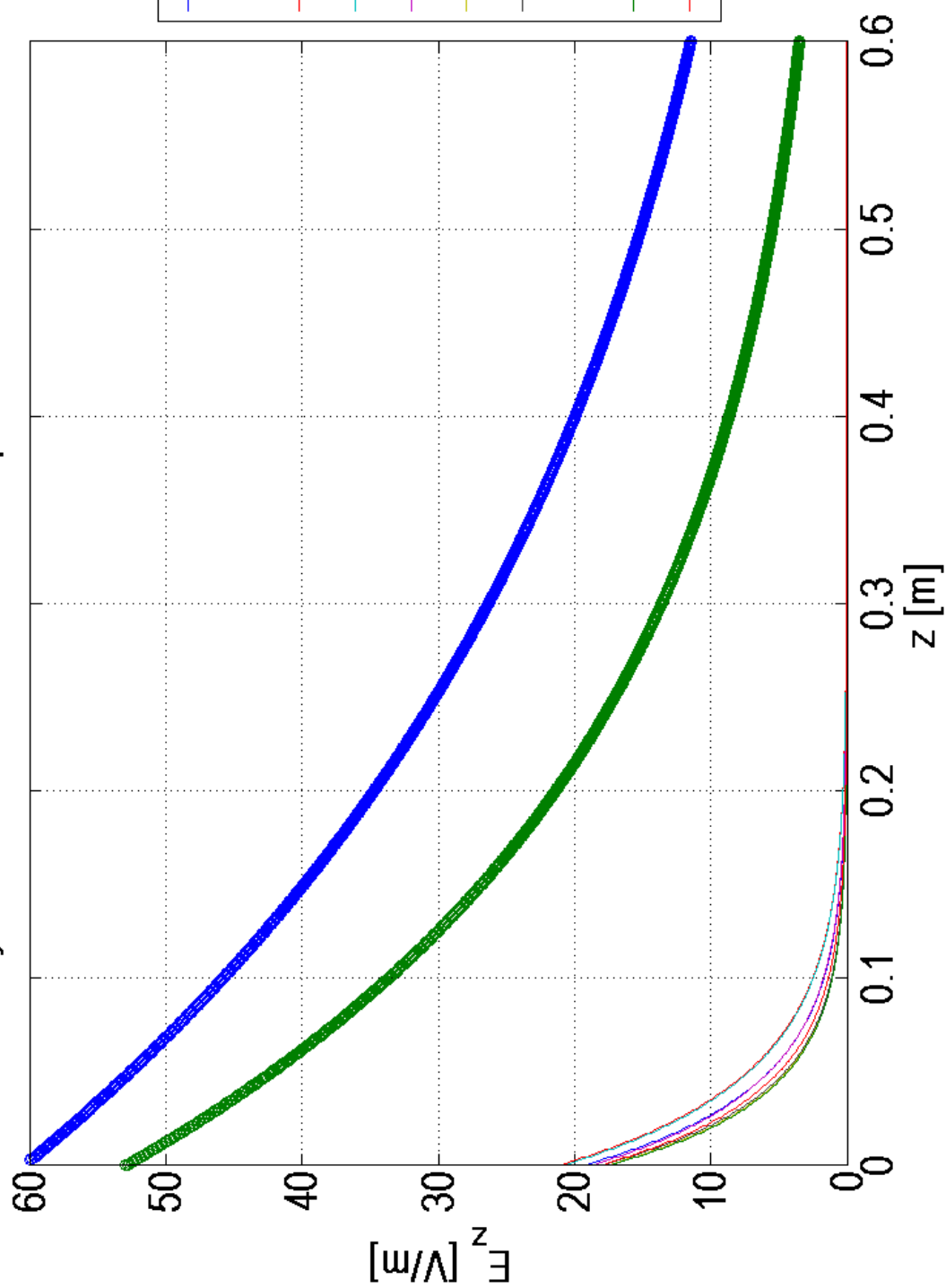
Obalka vlny v materialu na delce 0.6 m pro frekvenci 50 MHz



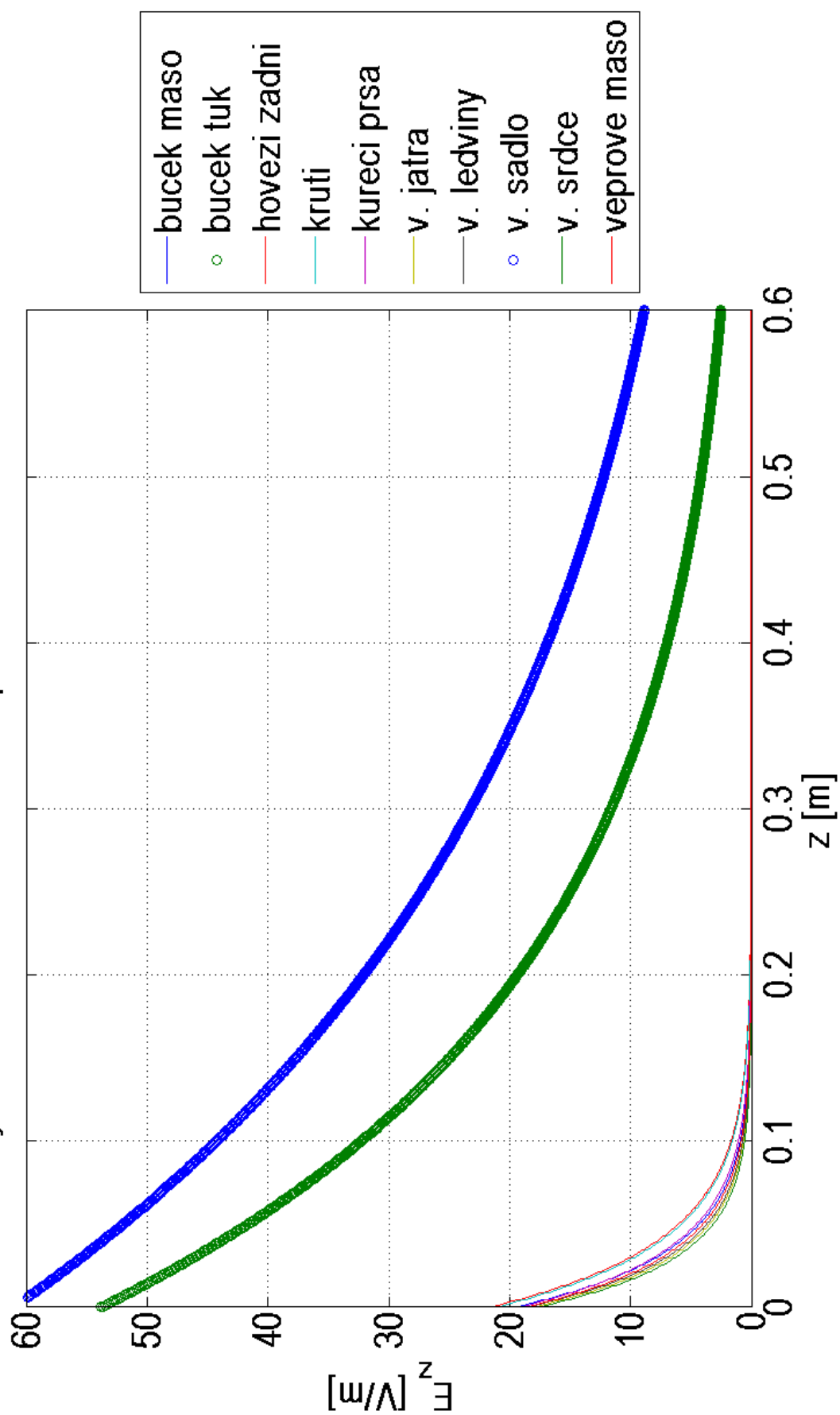
Obalka vlny v materialu na delce 0.6 m pro frekvenci 287.5 MHz



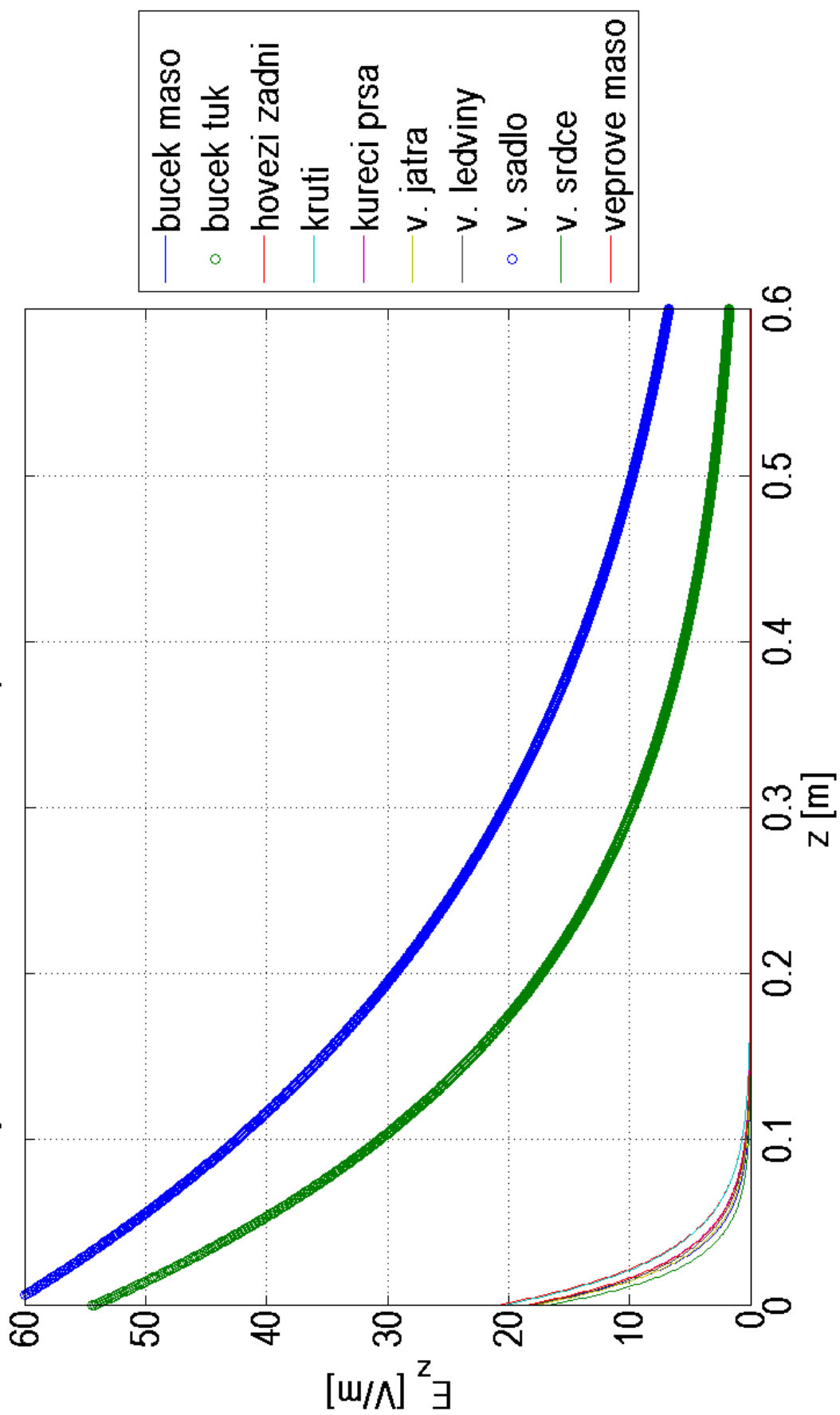
Obalka vlny v materialu na delce 0.6 m pro frekvenci 525 MHz

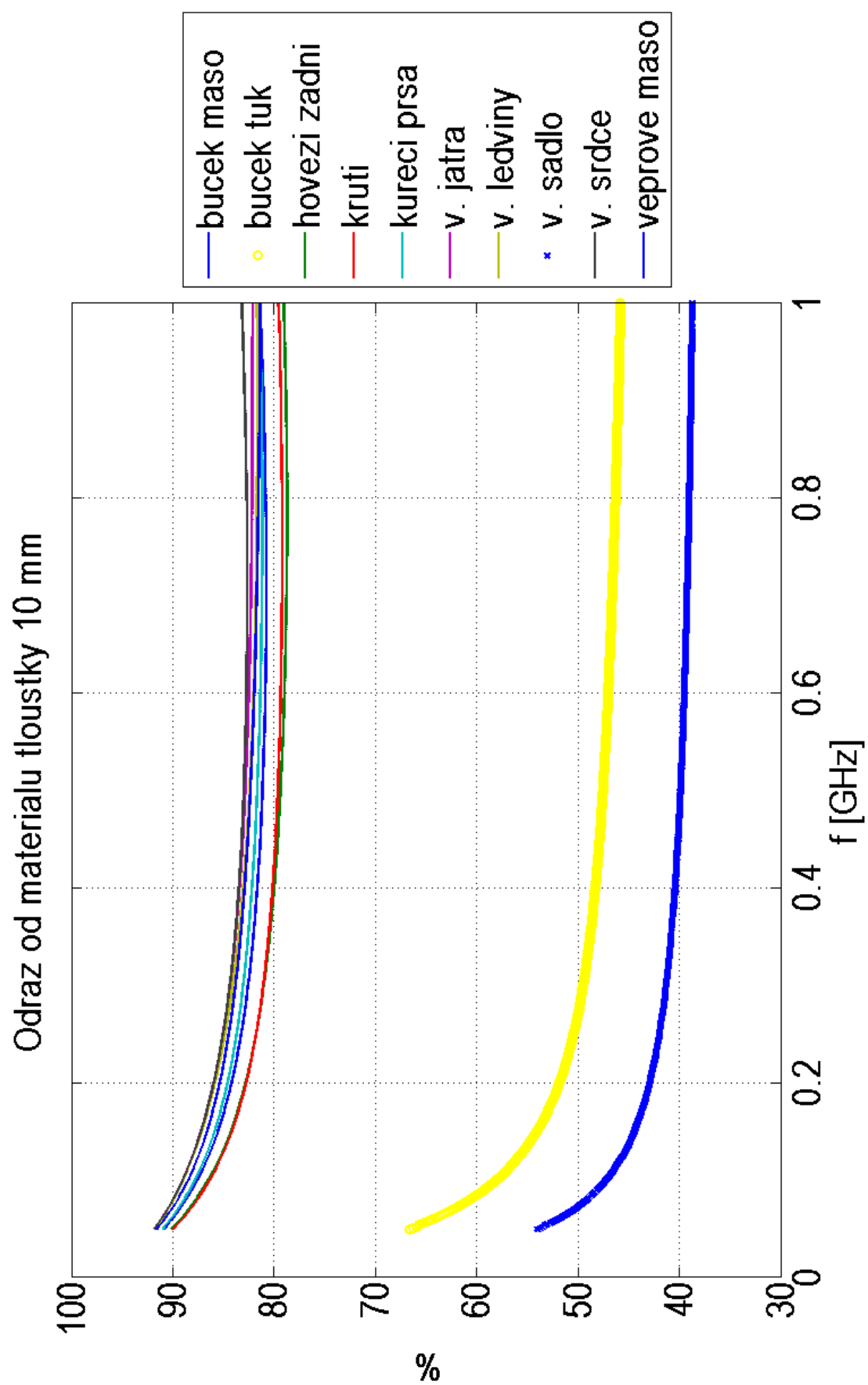


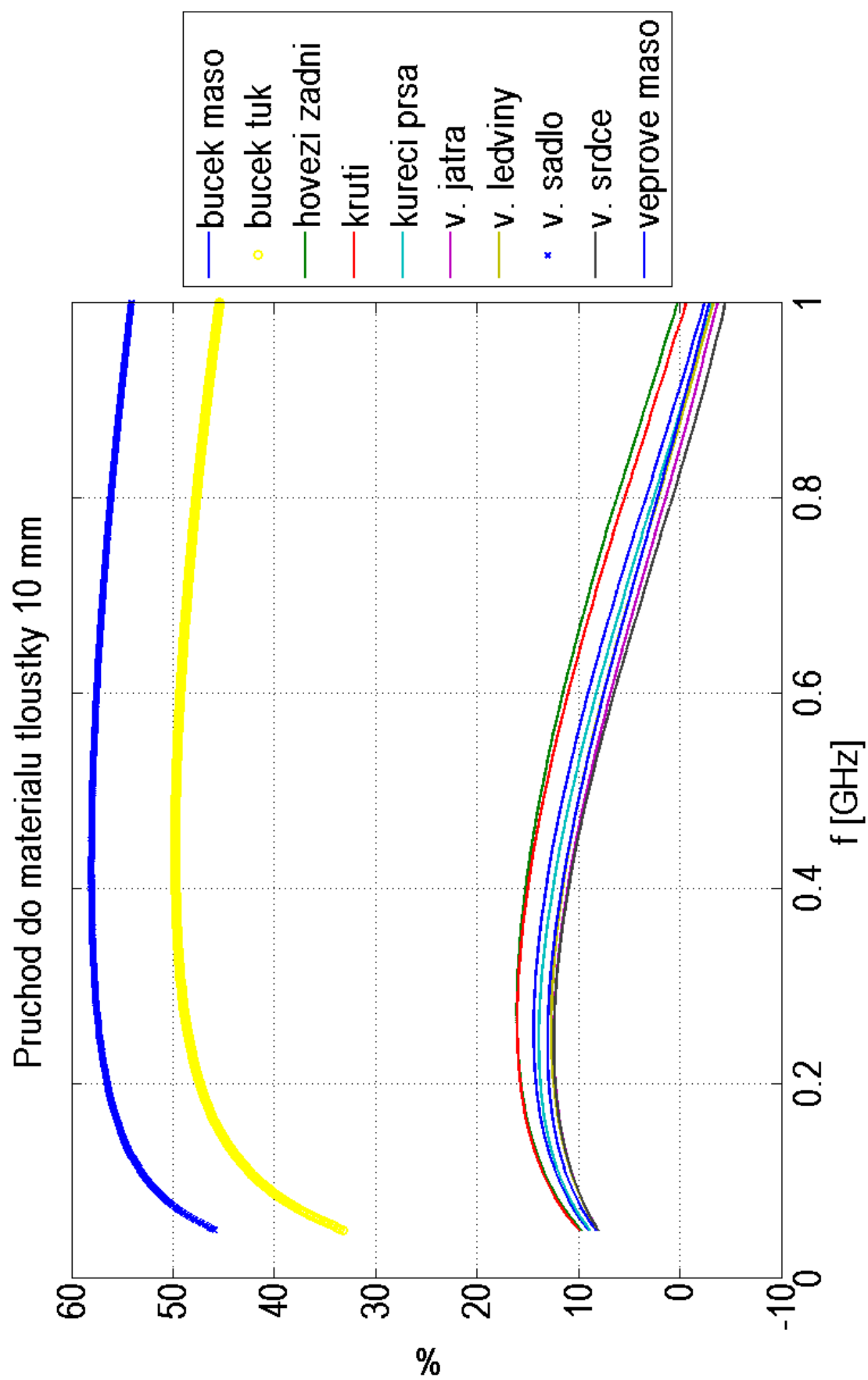
Obalka vlny v materialu na delce 0.6 m pro frekvenci 762.5 MHz

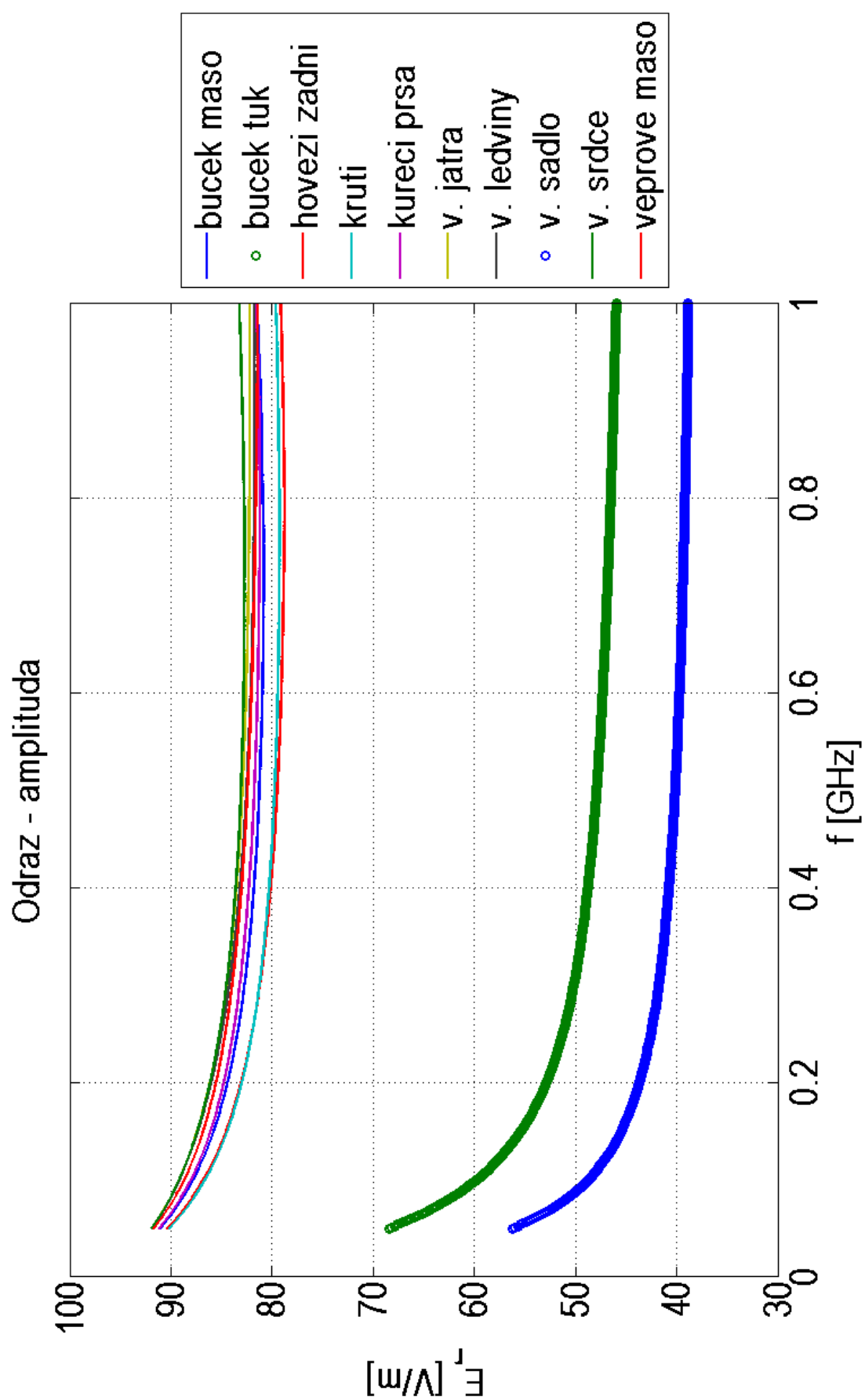


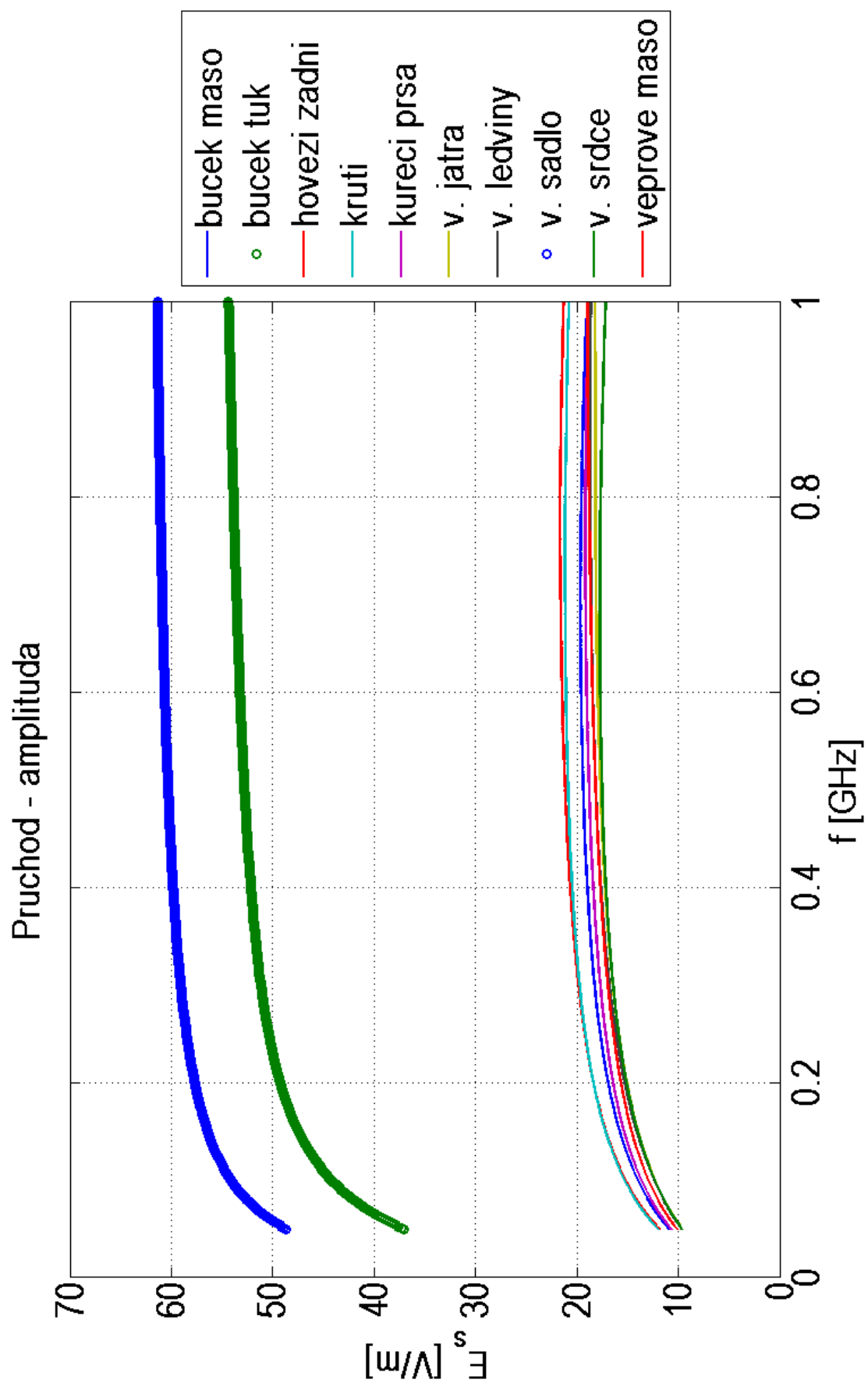
Obalka vlny v materialu na delce 0.6 m pro frekvenci 1000 MHz

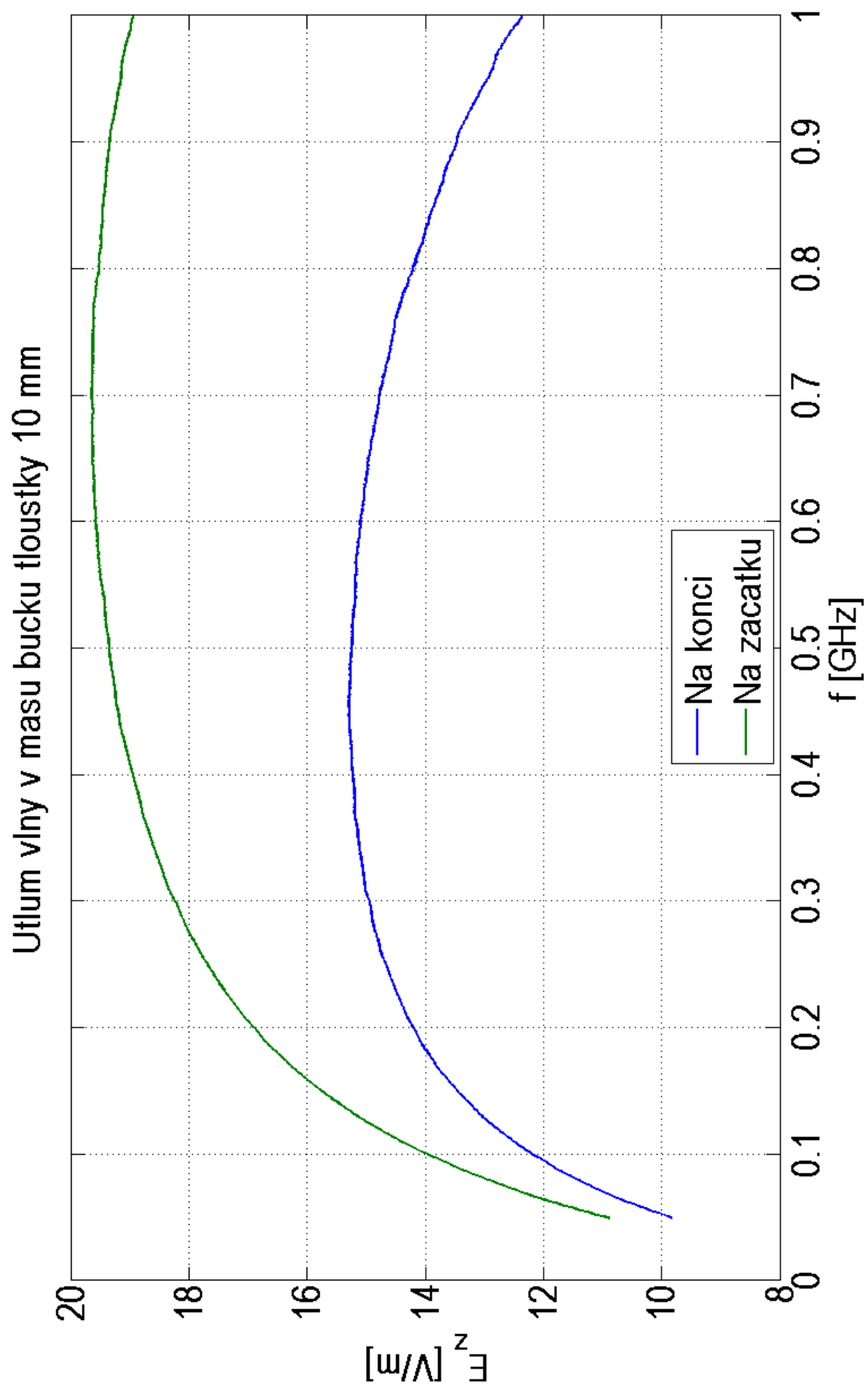


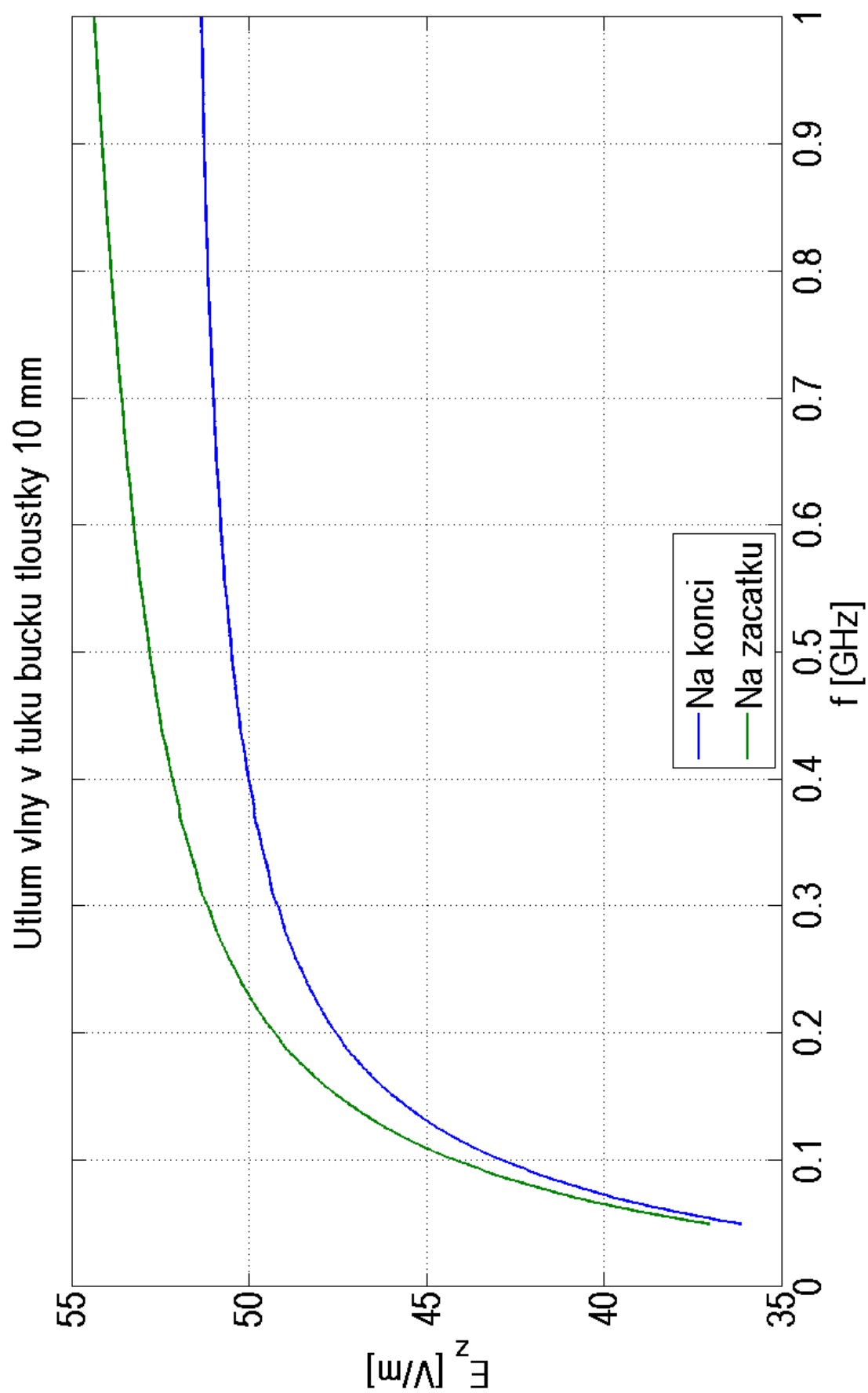


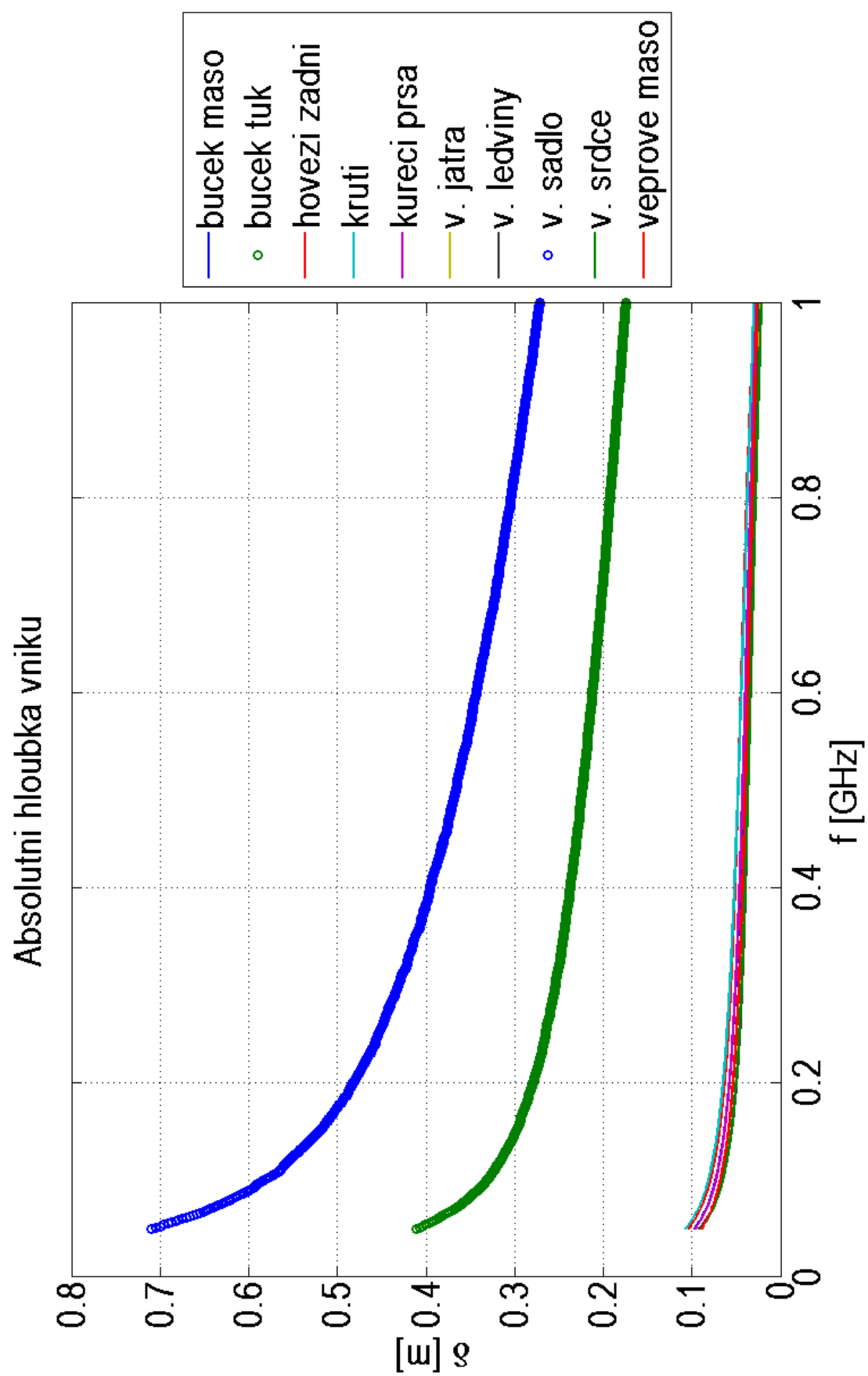


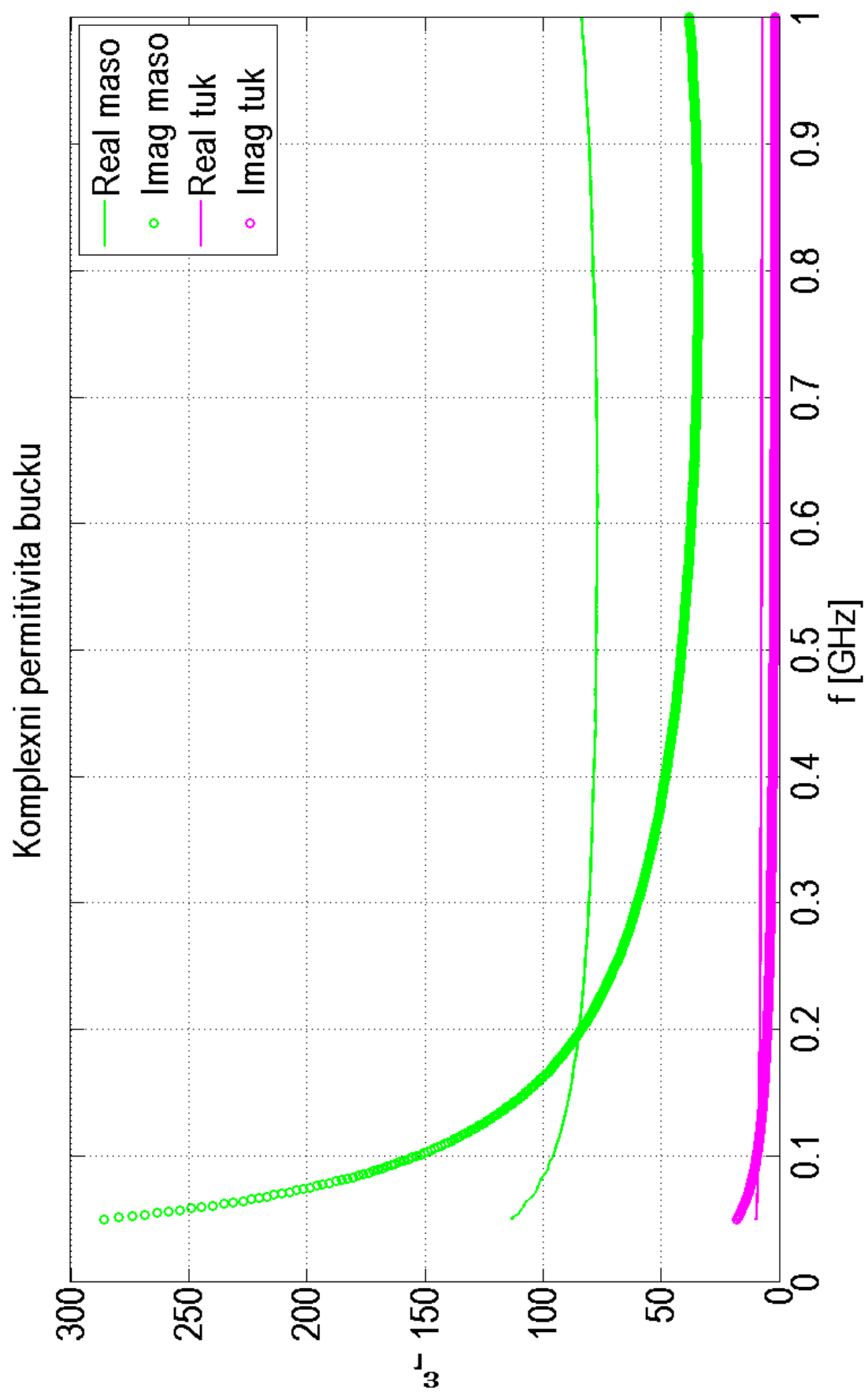












Příloha C

Data a grafy z měření pole

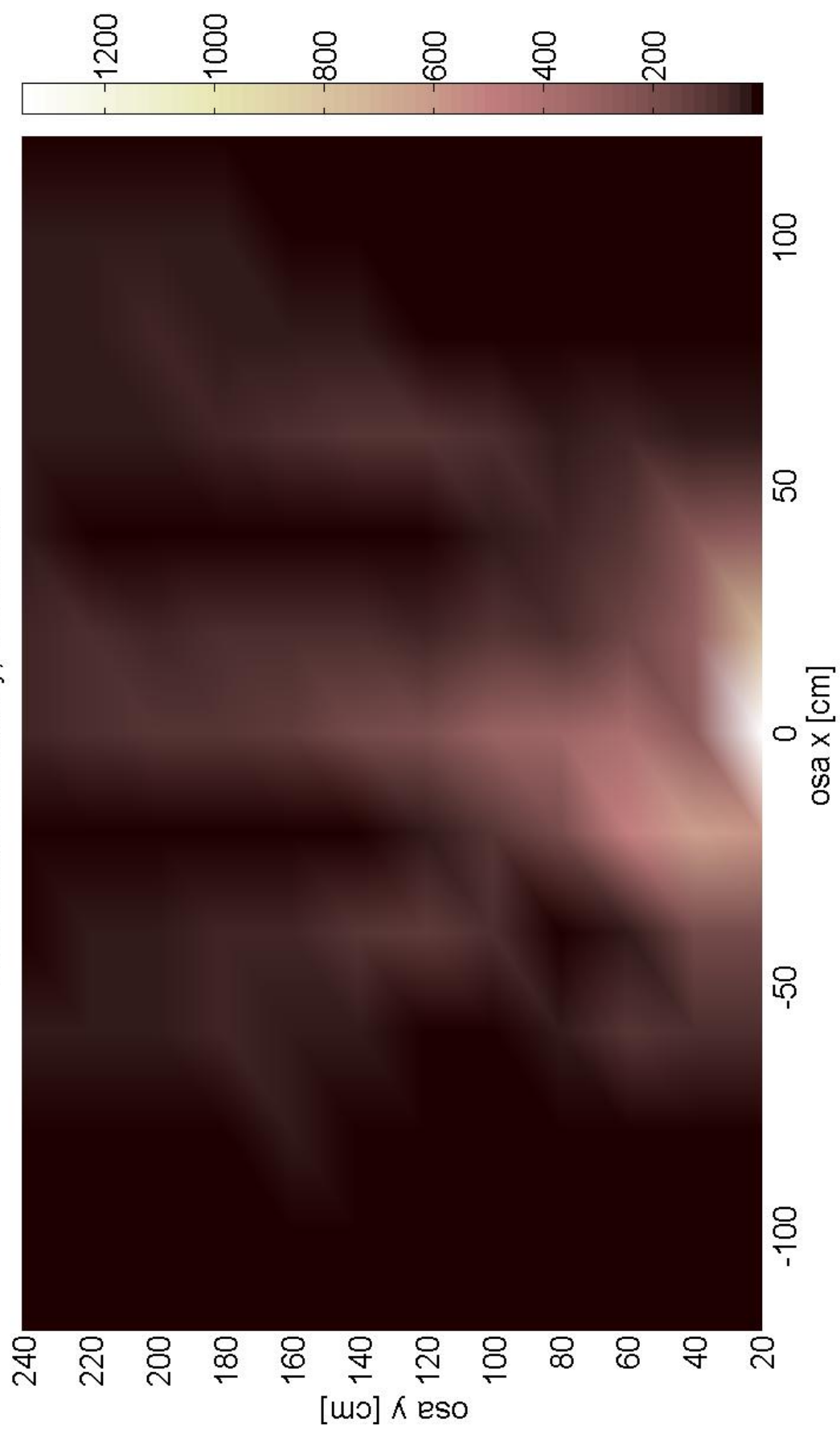
Pole mikrovlnné trouby, neovlivněné [$\mu\text{W}/\text{m}^2$]													
[cm]	-120	-100	-80	-60	-40	-20	0	20	40	60	80	100	120
20	14,6	9,0	3,0	64,0	190,0	580,0	1350,0	740,0	254,0	39,0	4,0	9,0	1,0
40	0,8	5,0	7,0	80,0	190,0	630,0	270,0	280,0	252,0	25,0	17,0	2,0	6,0
60	4,4	3,0	1,0	95,0	25,0	492,0	380,0	150,0	105,0	45,0	6,0	6,0	0,5
80	3,7	0,4	11,0	34,0	10,0	180,0	330,0	82,0	50,0	33,0	7,0	14,0	4,0
100	1,2	4,0	3,5	2,6	70,0	85,0	300,0	86,0	36,0	75,0	5,0	3,0	16,0
120	0,2	12,0	2,0	16,0	117,0	30,0	200,0	60,0	17,0	88,0	11,0	1,0	11,0
140	4,4	3,0	9,0	30,0	90,0	20,0	170,0	68,0	16,0	100,0	35,0	0,8	2,2
160	2,6	0,3	22,0	41,0	62,0	9,0	110,0	74,0	12,0	70,0	42,0	14,0	2,4
180	3,7	4,6	17,0	45,0	44,0	7,0	100,0	80,0	12,0	54,0	38,0	25,0	4,8
200	2,5	3,8	14,0	34,0	32,0	2,0	104,0	60,0	8,0	42,0	44,0	27,0	5,7
220	0,7	7,5	16,0	36,0	31,0	6,0	83,0	74,0	15,0	25,0	38,0	24,0	9,0
240	3,6	11,4	16,0	31,0	19,0	6,0	60,0	50,0	23,0	22,0	25,0	38,0	19,0

Pole mikrovlnné trouby, ovlivněné [$\mu\text{W}/\text{m}^2$]													
[cm]	-120	-100	-80	-60	-40	-20	0	20	40	60	80	100	120
20	23,5	3,7	33,0	15,0	27,0	510,0	850,0	738,0	324,0	26,0	3,8	1,5	2,2
40	4,1	7,4	9,1	16,0	117,0	473,0	435,0	311,0	282,0	20,0	14,0	4,9	6,1
60	14,8	1,7	10,7	23,0	56,0	350,0	120,0	196,0	179,0	74,0	6,9	10,0	1,3
80	1,5	2,2	30,4	10,0	110,0	150,0	50,0	91,0	165,0	67,0	16,2	13,7	8,4
100	12,8	12,0	11,0	20,0	122,0	65,0	29,0	50,0	130,0	42,0	27,3	2,0	3,3
120	18,6	5,9	4,4	96,5	103,0	20,0	30,0	21,0	90,0	72,0	12,1	12,0	10,5
140	11,7	9,0	8,7	88,8	84,0	22,0	15,0	17,0	84,0	200,0	200,0	11,7	5,4
160	1,9	10,0	29,3	110,0	57,0	1,7	7,0	8,2	55,0	200,0	200,0	1,6	1,1
180	3,8	29,2	46,0	53,0	30,0	2,7	15,9	3,7	42,0	0,3	2,0	0,5	4,1
200	15,6	37,0	39,2	51,0	14,8	0,5	4,0	1,2	22,0	1,8	1,2	1,6	0,7
220	22,5	21,0	35,6	35,0	19,5	2,5	2,5	3,6	13,0	1,1	3,2	1,6	4,4
240	20,3	39,2	28,0	30,0	7,2	1,0	1,2	0,4	10,0	4,8	1,9	1,1	0,7

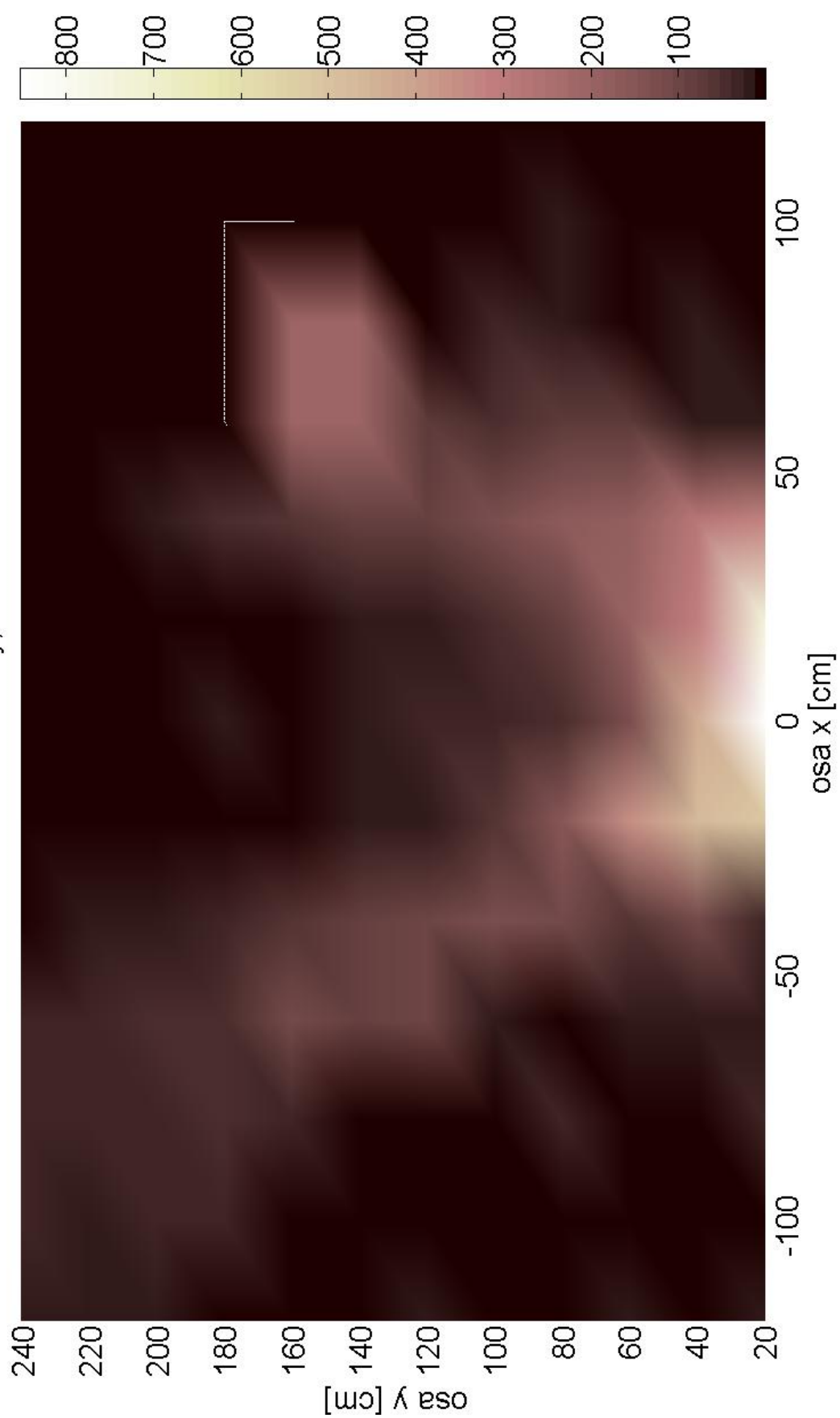
Pole wifi vysílače, neovlivněné [$\mu\text{W}/\text{m}^2$]													
[cm]	-120	-100	-80	-60	-40	-20	0	20	40	60	80	100	120
20	24	46	83	212	480	1026	1510	780	440	194	99	59	24
40	38	67	100	171	315	510	530	458	398	192	126	80	61
60	32	64	102	108	212	263	328	298	253	174	89	69	39
80	58	60	92	86	166	160	224	180	140	94	108	58	44
100	29	35	50	83	117	110	160	124	96	78	77	98	43
120	27	43	44	74	75	80	92	85	86	70	36	70	28
140	27	38	44	51	63	67	73	59	53	47	25	48	49
160	22	16	41	49	41	34	42	43	42	42	36	37	52
180	28	18	39	24	38	28	40	50	42	35	40	31	26
200	19	24	34	23	20	32	32	37	22	33	25	21	14
220	11	29	20	30	27	28	28	34	20	21	19	24	17
240	18	13	12	22	31	35	21	34	29	21	11	23	24

Pole wifi vysílače, ovlivněné [$\mu\text{W}/\text{m}^2$]													
[cm]	-120	-100	-80	-60	-40	-20	0	20	40	60	80	100	120
20	49,6	91,2	150,4	285,0	470,0	933,0	1572,0	920,0	489,0	193,0	100,0	76,0	18,8
40	83,7	85,2	147,1	250,0	270,0	420,0	684,0	547,0	391,0	291,0	92,0	108,0	68,8
60	52,8	78,1	145,3	162,0	178,0	245,0	390,0	312,0	254,0	239,0	170,0	79,0	68,4
80	62,6	81,0	133,0	103,0	164,0	228,0	216,0	190,0	168,0	82,0	130,0	70,0	54,0
100	53,3	58,4	55,0	83,2	125,0	300,0	300,0	300,0	84,0	98,0	82,0	86,0	66,1
120	35,8	60,0	41,8	73,4	42,0	300,0	300,0	300,0	150,0	54,0	81,0	58,0	61,1
140	42,0	22,4	57,8	66,4	14,0	0,2	0,7	4,5	39,0	113,0	25,0	53,0	40,7
160	25,6	33,4	55,8	44,7	1,9	5,9	2,3	3,2	10,7	70,0	78,0	36,0	42,3
180	24,7	49,1	47,0	22,7	0,5	5,1	3,0	4,2	3,2	33,0	51,0	82,0	28,6
200	36,0	39,1	30,0	5,0	2,0	3,5	1,8	7,7	2,0	29,0	64,0	50,0	30,6
220	29,2	28,9	13,3	2,3	5,5	3,5	12,2	7,4	7,5	2,8	25,0	37,0	29,8
240	26,1	14,5	6,3	2,9	5,4	3,7	3,0	2,4	4,3	3,5	4,0	36,0	41,8

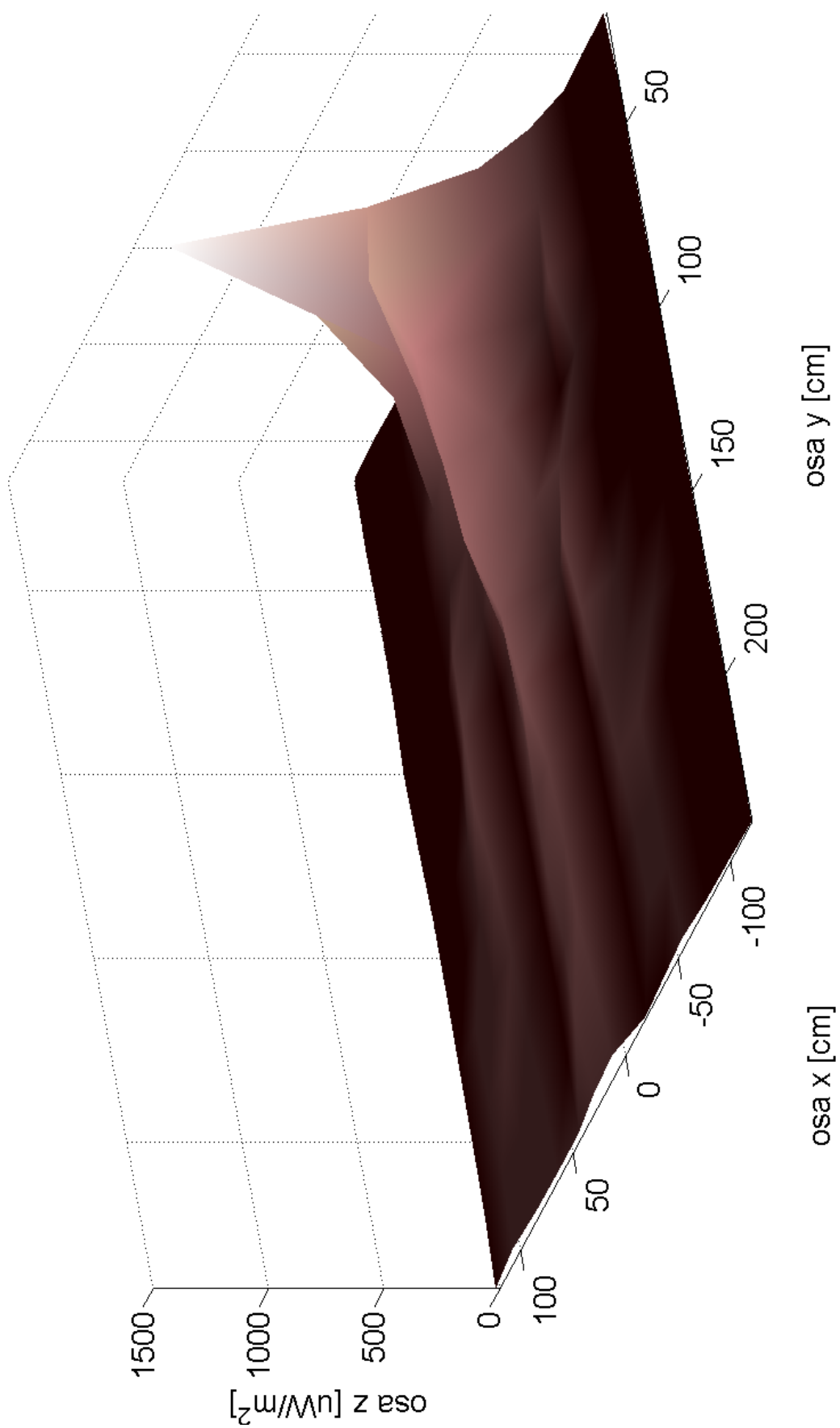
Pole mikrovlnné trouby, neovlivněné



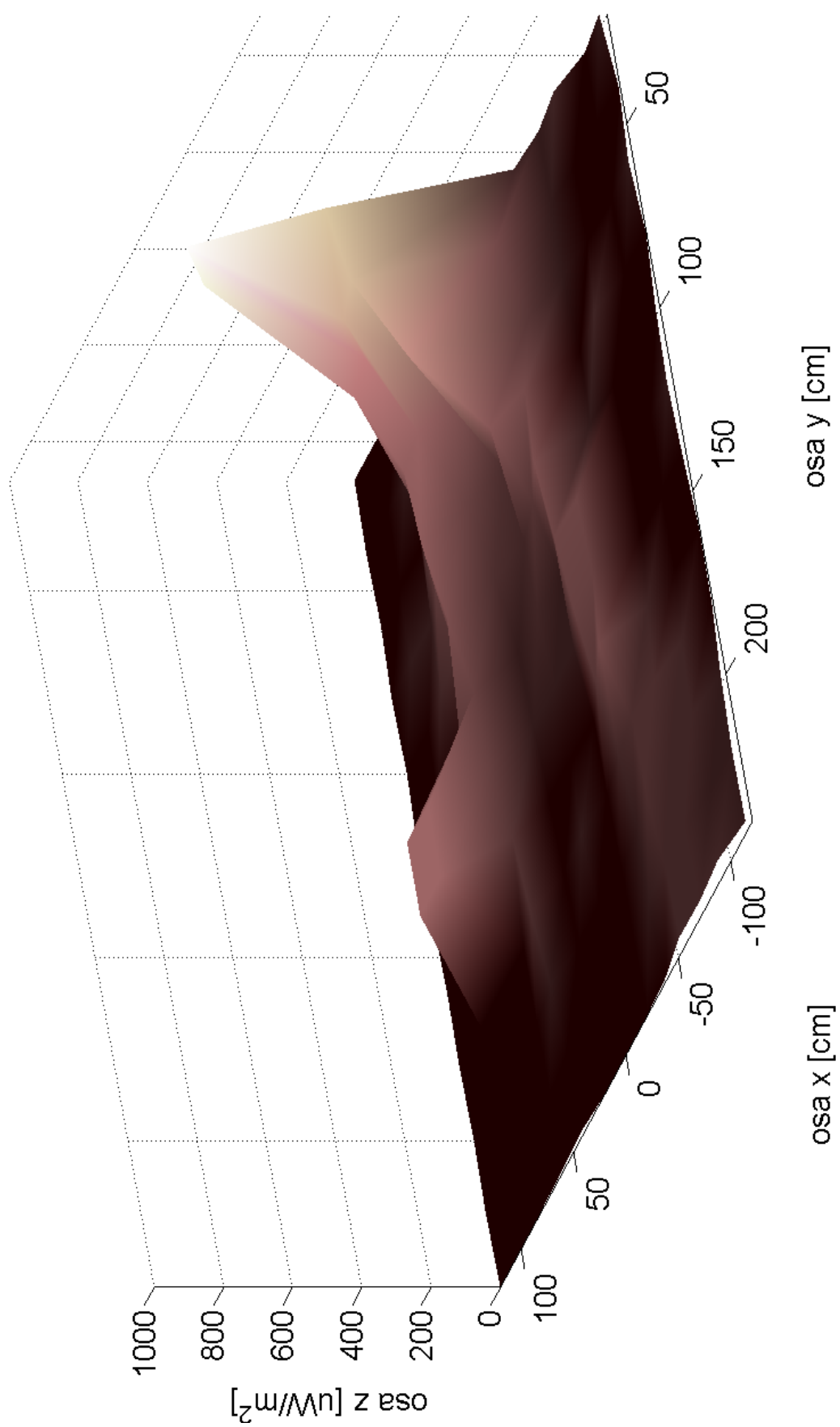
Pole mikrovlnné trouby, ovlivněné



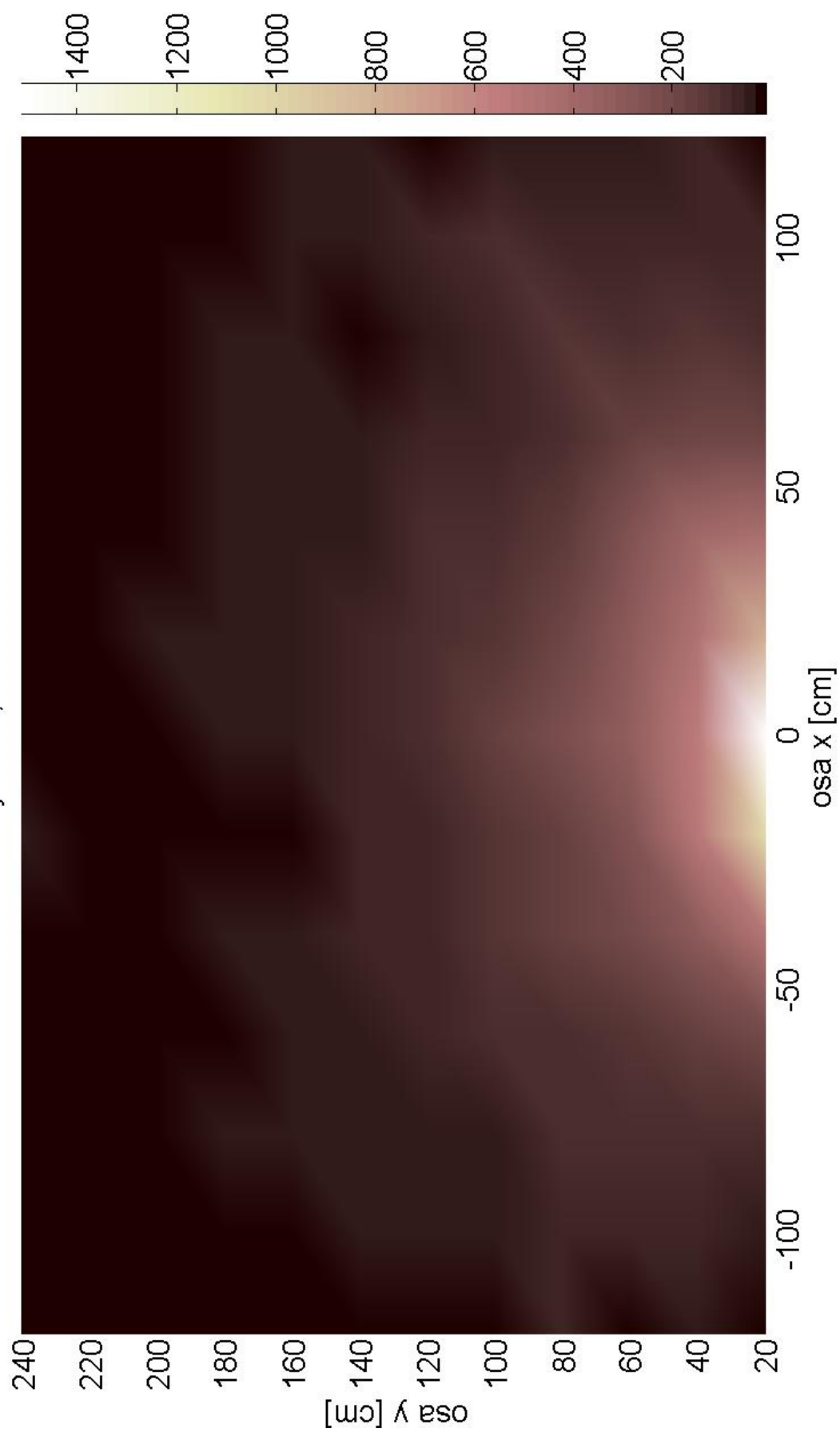
Pole mikrovlnné trouby 3D, neovlivněné



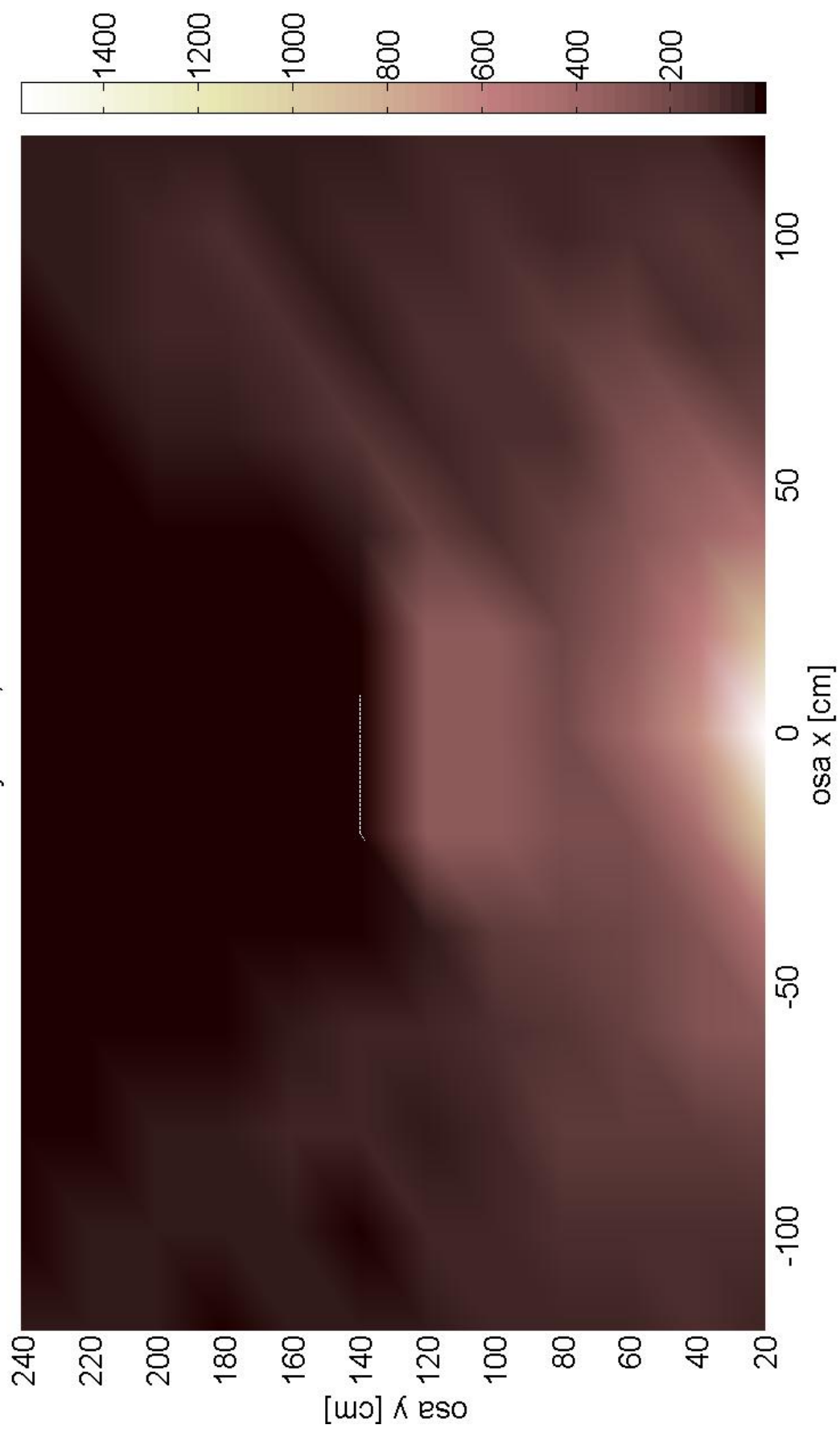
Pole mikrovlnné trouby 3D, ovlivněné



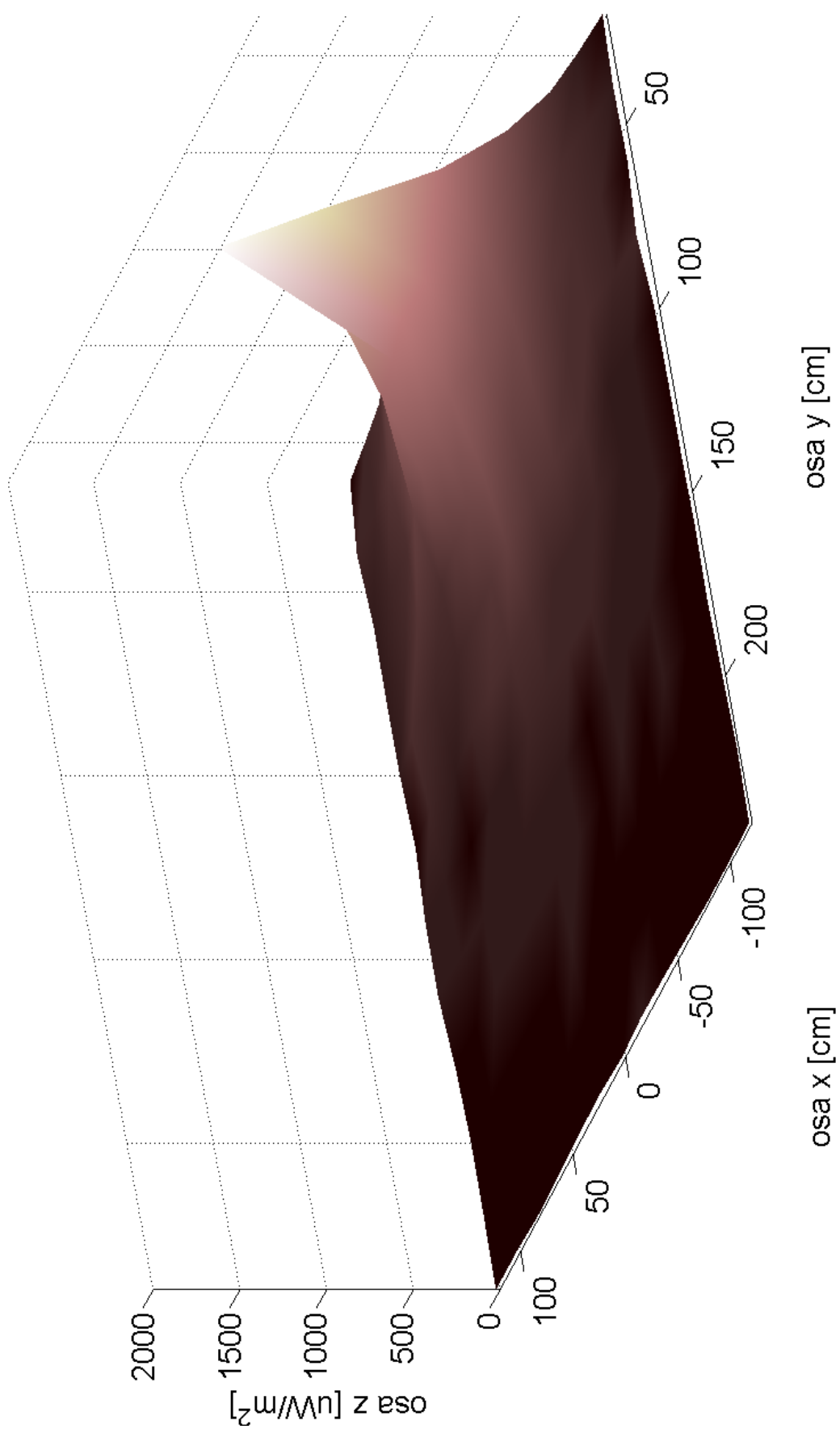
Pole wifí vysílače, neovlivněné



Pole wifi vysílače, ovlivněné



Pole wifi vysílače 3D, neovlivněné



Pole wifi vysílače 3D, ovlivněné

